



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SAMU VESA
NESTETYPELLÄ JA KASKADIKOMPRESSORILLA JÄÄHDYTET-
TÄVÄ KOKOVARTALON KYLMÄHOITOHUONE

Diplomityö

Tarkastaja: dosentti Hannu Ahlstedt
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekuntaneuvos-
ton kokouksessa 17.8.2016

TIIVISTELMÄ

SAMU VESA: Nestetypellä ja kaskadikompressorilla jäähdytettävä kokovartalon kylmähoituhuone
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 51 sivua, 2 liitesivua
Syyskuu 2016
Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Energiatehokkuus
Tarkastaja: dosentti Hannu Ahlstedt

Avainsanat: kokovartalon huippukylmähoito, lumisumu, nestetyypijäähdytys, epästationääri lämmönsiirto

Tässä diplomityössä tutkittiin Oy Cryon Ltd:n patenttihakemuksen kohteena olevaa kokovartalon huippukylmähoituhuoneen toteutustapaa. Kokovartalon huippukylmähoidolla tarkoitetaan hoitomuotoa, jossa ihminen altistetaan vähissä vaatteissa 1-4 minuutiksi $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai tätä kylmemmälle ilmalle.

Tarkastelussa olevan huippukylmähoitoyksikön jäähdytys toteutetaan perinteisen kaskadikompressorijäähdytyksen ja nestetypen yhdistelmällä. Poikkeuksena muihin huippukylmähoitoihin työn aiheena olevassa järjestelmässä on se, että tilaan tuotetaan tarkoituksella mikrokiteistä jätettä, joka mahdollistaa hoituhuoneen sisäilman hengittämisen ilman kasv suojausta. Sisäilman suora hengittäminen tehostaa merkittävästi kylmähoidon myönteisiä vaikutuksia.

Työn tärkeimpänä tutkimuskohteena oli kylmähoitoyksikössä syntyvien lämpökuormien, ja näiden pohjalta nestetypen kulutuksen, mahdollisimman tarkka määrittäminen. Koska kylmähoitoyksikköä ei pidetä kylmänä jatkuvasti kuten esimerkiksi pakkasvarastoja, laskenta painottui epästationääriin lämmönsiirtoon. Laskennan epästationääri osuus suoritettiin differenssimenetelmällä. Laskennassa selvitettiin eristerakenteesta tuleva lämpökuorma ja asiakkaiden muodostama lämpökuorma.

Työn merkittävimpinä tuloksina selvisi, että jaksottaisessa jäähdytyksessä suurin lämpökuorma muodostuu jäähdytyksen alkupuolella. Alkuvaiheen jäähdytysteho kuluu erityisesti eristerakenteen jäähdyttämiseen. Lämpökuorma on suurimmillaan, kun tilassa saavutetaan tavoitelämpötila. Tämän jälkeen eristerakenteen lämpötilajakauma alkaa hakeutua sille ominaiseen tasapainotilaan lämpökuorman samalla pienentyessä. Huippukylmähoitotilan tapauksessa tasapainotila saavutetaan noin neljässä tunnissa.

Nestetyyppi on tarkastellussa järjestelmässä asiakasmäärää rajoittava resurssi. Nestetypen kulutusta voidaan kuitenkin pienentää pitämällä hoitoyksikön ilmaa kylmänä kaskadikompressorijärjestelmällä ennen nestetyypijäähdytyksen aloittamista.

ABSTRACT

SAMU VESA: Whole-body cryotherapy chamber refrigerated by liquid nitrogen and cascade compressor

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 51 pages, 2 appendix pages

September 2016

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

Major: Energy Performance

Examiner: Adjunct Professor Hannu Ahlstedt

Keywords: whole-body cryotherapy, ice mist, liquid nitrogen refrigeration, unsteady heat transfer

In this master's thesis, a research concerning a whole-body cryotherapy chamber of Oy Cryon Ltd (patent pending), was conducted. Whole-body cryotherapy is a treatment method where a patient is exposed to $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ and colder air wearing minimal clothing.

Refrigeration of the cryotherapy chamber is done using a hybrid of a traditional cascade compressor system and liquid nitrogen. The difference between studied system and other cryotherapy chambers is the intentional generation of microcrystalline ice (ice mist) to the chamber air. This ice mist allows a patient to breathe air easily without wearing a mask. Inhaling the extreme cold air without a mask increases the positive effects of the treatment.

The main goal of the thesis was to determine the heat loads formed in the cryotherapy room, and from these results calculate the amount of liquid nitrogen needed on a daily basis. The cryotherapy chamber is not refrigerated constantly, like commercial freezers for example, thus the calculations concerned mainly unsteady heat transfer. Unsteady heat transfer section was calculated using finite-difference method. As results, the heat loads through insulation and from patients were found.

The most noteworthy finding of the thesis was that the most significant heat load takes place in the initial part of the refrigeration. Most of the initial refrigeration capacity is consumed on the refrigeration of the insulation structure. The heat load from the insulation is at its greatest when the chamber air reaches the goal temperature. After that, the temperature distribution of the insulation begins to seek the characteristic stationary state and the heat load diminishes. In the cryotherapy chamber, insulation is cooled to the stationary conditions in approximately four hours.

Liquid nitrogen is a resource limiting the amount of customers in the cryotherapy system in consideration. The consumption of the liquid nitrogen can be reduced by running the cascade compressor system solely before starting the liquid nitrogen refrigeration.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Oy Cryon Ltd:n tarjoamasta aiheesta. Haluan kiittää Oy Cryon Ltd:n toimitusjohtajaa Markku Kauneelaa mielenkiintoisesta aiheesta ja opastuksesta työn aikana. Haluan kiittää Markku Kauneelaa myös mahdollisuudesta tutustua startup-yrityksen toimintaan diplomityön ohessa.

Haluan kiittää työn tarkastajaa dosentti Hannu Ahlstedtia työn aikaisista neuvoista ja työn tarkastamisesta. Kiitos myös erinomaisesta opetuksesta diplomityötä edeltäneillä opintojaksoilla.

Haluan kiittää Niko Niemelää ja Julius Elfvingiä avusta hetkinä, joina työ ei tahtonut edetä. Teistä oli enemmän apua kuin uskottekaan. Haluan kiittää myös muita opiskelutovereitani: teitte opiskelujasta TTY:llä erityistä.

Haluan kiittää perhettäni elämänmittaisesta tuesta ja turvasta ja Veeraa viime vuosien huolenpidosta. Lopuksi haluan vielä osoittaa erityiskiitoksen äidilleni, joka käynnisti kanssani ylioppilaskirjoitusten alla projektin nimeltä ”Samu diplomi-insinööriksi”. Projektin alkaa olla tätä kirjoittaessa jo melko pitkällä.

Tampereella, 16.9.2016

Samu Vesa

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Lääketieteellinen tausta	1
1.2	Kylmähoitotila lyhyesti	2
1.3	Tutkimuksen tarkoitus	3
1.4	Työn rakenne	3
2.	LÄMPÖTEKNINEN TEORIA	4
2.1	Termodynamiikan perusteet	4
2.2	Lämmönsiirto	5
2.2.1	Johtuminen	6
2.2.2	Lämpösäteily	6
2.2.3	Konvektio	7
2.3	Epästationäärin lämmönsiirron mallintaminen	10
3.	KYLMÄHOITOYKSIKÖN ESITTELY	13
3.1	Eristystekniikka	13
3.2	Ovet, kulkuaukot ja ikkunat	14
3.3	Kylmätekniikka	14
3.4	Lämpökuormaa aiheuttavat laitteet	16
3.5	Liikuteltava yksikkö ja erilaiset asennuskohteet	16
4.	KYLMÄHOITOTILAN JÄÄHDYTYS	18
4.1	Jäähdytystehontarve	18
4.1.1	Seinämien kautta tuleva lämpökuorma	18
4.1.2	Tilassa hoidettavien ihmisten aiheuttama lämpökuorma	20
4.1.3	Lisäilma ja laitekuormat	21
4.2	Jäähdytysprosessi	23
4.2.1	Kaskadikompressorijäähdytys	23
4.2.2	Nestetyyppijäähdytys	24
4.2.3	Lumisumun tuottaminen	26
5.	LASKENTAMENETELMÄT	29
5.1	Stationääri lämpötilajakauma eristerakenteessa	29
5.2	Epästationääri lämpötilajakauma eristerakenteessa	30
5.3	Lämpökuormien laskenta	32
5.3.1	Seinämien läpi ja eristerakenteesta tuleva lämpökuorma	32
5.3.2	Asiakkaan tuottama lämpökuorma	32
5.3.3	Lisäilman aiheuttama lämpökuorma	33
5.3.4	Nestetyypen kulutus	33
6.	TULOKSET	34
6.1	Lämpötilajakaumat	34
6.2	Lämpökuormat	37
6.2.1	Seinämien kautta tuleva lämpökuorma	37
6.2.2	Asiakkaiden muodostama lämpökuorma	42

6.2.3	Lisäilman ja laitteistojen aiheuttama lämpökuorma	44
6.3	Nestetyypen kokonaiskulutus.....	44
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	47
7.1	Nestetyypen kulutus ja toteutustapamuutokset	47
7.2	Tulevaisuuden kehityskohteet	48
	LÄHTEET.....	49
	LIITE A: TEKNISEN TILAN ASEMOINTIVAIHTOEHTOJA.....	52

LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>FDM</i>	Differenssimenetelmä
<i>A</i>	pinta-ala, m ²
<i>Bi</i>	Biotin luku
<i>c_p</i>	ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa, kJ/(kgK)
<i>E_b</i>	säteilyteho, W/m ²
<i>F</i>	näkyvyyskerroin
<i>Fo</i>	Fourier'n luku
<i>g</i>	gravitaatiokiihtyvyys, 9,81 m/s ²
<i>Gr</i>	Grashofin luku
<i>H</i>	korkeus, m
<i>h</i>	entalpia, kJ/kg
<i>h_c</i>	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, W/(m ² K)
<i>k</i>	lämmönjohtavuus, W/(mK)
<i>K</i>	korjauskerroin
<i>L</i>	karakteristinen pituus, m
<i>ṁ</i>	massavirta, kg/s
<i>N</i>	ainemäärä, kmol
<i>Nu</i>	Nusseltin luku
<i>p</i>	paine, Pa
<i>P</i>	teho, W
<i>Pr</i>	Prandtlin luku
<i>Q</i>	lämpö, kJ
<i>q</i>	lämpövuoto, W/m ²
<i>R</i>	yleinen kaasuvakio 8,3143 kJ/(kmolK)
<i>R</i>	lämpövastus, Km ² /W
<i>Ra</i>	Rayleigh'n luku
<i>T</i>	lämpötila, K
<i>U</i>	sisäenergia, kJ
<i>U</i>	lämmönläpäisykerroin, W/(m ² K)
<i>v</i>	ominaistilavuus, m ³ /kg
<i>V</i>	tilavuus, m ³
<i>W</i>	työ, kJ
<i>X</i>	paksuus, m
<i>α</i>	terminen diffusiviteetti, m ² /s
<i>β</i>	tilavuuden lämpötilakerroin, ideaalikaasulle 1/T
<i>Δt</i>	aika-askel, s

Δx	pituusaskel, m
ε	emissiviteetti
ν	kinemaattinen viskositeetti, m ² /s
ρ	tiheys, kg/m ³
σ	Stefan-Boltzmannin vakio $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$
φ	suhteellinen kosteus
Φ	lämpövirta, W
Ψ	Prandtlin luvun funktio

1. JOHDANTO

Kokovartalon huippukylmähoidolla tarkoitetaan hoitomenetelmää, jossa hoidettava henkilö altistetaan $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$:n ja sitä matalammille lämpötiloille vähäisessä vaatetuksessa noin kolmen minuutin ajan [1; 2]. Oy Cryon Ltd on hakenut patenttia kokovartalon kylmähoitohuoneen toteutustavalle (hakemus nro 20150362, Järjestelmä huippukylmähoitoon), jossa kylmähoitotilan vaatima $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$:n tai tätä kylmempi lämpötila tuotetaan sähkökaskadikompressorijärjestelmän ja paikan päällä nesteytetyn typen avulla. Nestetyppi tuotetaan Stirling Cryogenicsin valmistamalla nestetyypikompressorilla, joka nesteyttää typen suoraan konehuoneeseen tulevasta ulkoilmasta. Patenttihakemukselle on saatu myönteinen välipäätös Patentti- ja rekisterihallitukselta ja hakuprosessi on edennyt kansainvälisen patentin hakemisvaiheeseen.

Poikkeuksena perinteisiin kokovartalon kylmähoitohuoneisiin Cryonin järjestelmässä on se, että kylmähoitotilaan tuotetaan tarkoituksella mikrokiteistä jäätä eli ”lumisumua”, kun perinteisissä kylmähoitotiloissa muodostuvasta lumisumusta pyritään eroon. Perinteisissä järjestelmissä hoitotilan ilma on liian kuivaa hengitettäväksi, joten tilassa on käytettävä kasvosuojainta [2]. Toisin kuin perinteisesti toteutetuissa kylmähuoneissa, lumisumua sisältävää kylmää ilmaa on miellyttävä hengittää myös ilman kasvosuojainta, sillä lumisumu kosteuttaa hengitysilmaa sulaessaan hengitystiehyissä. Hengitystiet, etenkin nenäontelot, sisältävät runsaasti hermopäätteitä. Näiden hermopäätteiden aktivoiminen on tärkeää, kun halutaan saavuttaa maksimaalinen hoitoteho kokovartalon kylmähoidossa. Kasvosuojainta käytettäessä maksimaalista tehoa ei saavuteta.

1.1 Lääketieteellinen tausta

Kokovartalon huippukylmähoidolla on monia myönteisiä terveydellisiä vaikutuksia. Hoitomenetelmä kehitettiin alun perin reumaattisten sairauksien kuten nivelrikon, niveltulehduksen ja fibromyalgian hoitoon [2]. Kylmähoidon tiedetään vähentävän potilaiden tuntemaa kipua ja lievittävän tulehdistiloja [3].

Reumaattisia oireita pienentävien vaikutusten lisäksi kylmähoidon tiedetään nopeuttavan urheilusuoritusten jälkeistä palautumista [4; 5] ja vaikuttavan elimistön eri mielihyvähormonien ja välittäjäaineiden kuten endorfiinin ja dopamiinin eritykseen [6]. Viime vuosina kokovartalon kylmähoidolla on huomattu olevan lupaavia vaikutuksia myös masennusoireiden hoidossa [7; 8].

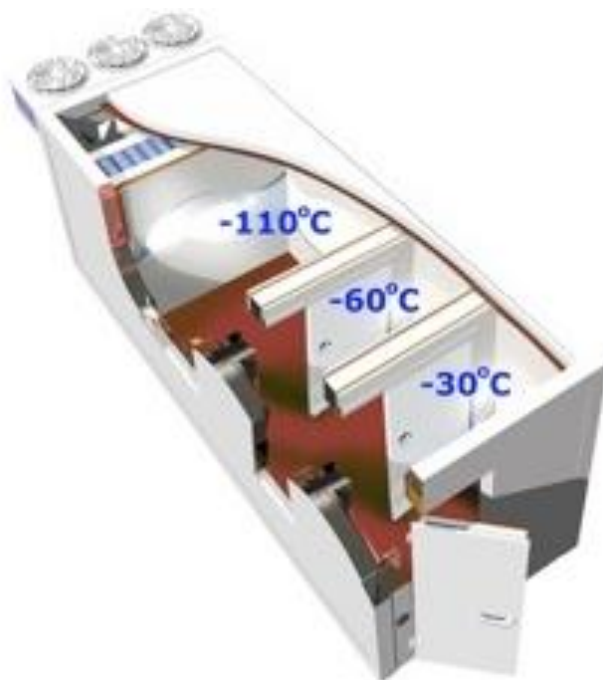
Edellä mainittujen hyötyjen lisäksi kokovartalon kylmähoidolla voidaan vaikuttaa myös veren kolesterolitasapainoon [1] ja elimistön glukoosi- ja rasvatasapainoon, erityisesti

niin sanotun ruskean rasvan muodostumiseen kehossa [3; 9]. Kylmähoidon aiheuttaman ”kylmäsokin” vaikutuksesta valkea viskeraalirasva alkaa hajota ihmiskehossa muodostaen tilalle ruskeaa rasvaa. Valkea rasva toimii kehossa energian varastointiyksikkönä ruskean rasvan toimiessa tehokkaana lämmöntuotantoyksikkönä [9]. Ruskea rasva käyttää lämmöntuotantoon kehoon varastoitunutta glukoosia. Ruskean rasvan osuuden kasvusta kehossa seuraa henkilön kasvanut glukoosin kulutus, mikä johtaa laihutumiseen ruokailutottumusten pysyessä ennallaan. Oy Cryon Ltd:n kylmähoituhuone pyrkii olemaan pääasiallisesti painonhallintaa ja yleistä hyvinvointia edistävä laitteisto.

1.2 Kylmähoitotila lyhyesti

Työn aiheena oleva kylmähoitoyksikkö koostuu hoituhuoneesta, välitilasta ja tuulikaapistista. Näiden tilojen lämpötilat ovat noin $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ edellä mainitussa järjestyksessä. Kylmähoitoyksikkö voidaan sijoittaa esimerkiksi riittävän suuren huoneiston sisälle. Kylmähoitoyksikön ulkopuolinen lämpötila on tällöin noin $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hoitotilaan mennään liukuovien läpi niin, että ensin mennään hoitotilan ulkopuolisesta tilasta tuulikaappiin ja tuulikaapista välitilaan. Tämän jälkeen mennään itse hoituhuoneeseen, jossa ollaan noin kolme minuuttia. Tilassa voidaan hoitaa kerralla enintään viittä asiakasta. Hoitotilan periaate on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Kylmähoitoyksikön periaatekuva [10]. Yksikkö koostuu tuulikaapista, välitilasta ja hoituhuoneesta, joiden lämpötilat ovat -30 , -60 ja $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ edellä mainitussa järjestyksessä. Kylmähoitoyksikkö sisältää lisäksi teknisen tilan, johon on sijoitettu kaskadikompressorikoneikko ja nestetyypen ilmasta erotteleva laitteisto.

Kylmähoitotilan jäähdytys toteutetaan kaksi- tai kolmeportaisen suljetun kaskadikompressorikierron ja nestetyypin avulla niin, että kaskadikompressorijärjestelmä jäähdyttää hoitotilan noin $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan, minkä jälkeen kaskadikompressorijärjestelmän toiminta pysäytetään. Tämän jälkeen käynnistyy nestetyypin syöttö höyrystimille. Nestetyypin avulla hoitotila jäähdytetään tavoitelämpötilaan eli $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen. Nestetypellä toteutetaan lämpötilan ylläpito tässä tavoitelämpötilassa hoitotilan ollessa käytössä.

1.3 Tutkimuksen tarkoitus

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia Oy Cryon Ltd:n patentin toteutuskelpoisuutta. Työssä mitoitetaan erinäisiä kylmätekniisiä mittalukuja, joista tärkein on nestetyypin kulutus. Arvioidun nestetyypin kulutuksen pohjalta valitaan koko laitteiston kallein komponentti eli nestetyypikompressor. Nestetyypikompressorin valinnan lisäksi työssä tutkitaan mahdollisia luvussa 1.2 esitetystä standarditoteutustavasta poikkeavia kylmähoitoyksikön toteutusratkaisuja. Näitä vaihtoehtoisia toteutustapoja voivat olla esimerkiksi yhden tai molempien välihuoneiden poisjättäminen tai kaskadikompressorijärjestelmän poisjättäminen.

Mitoitusarvojen laskennan lisäksi työn edetessä pyritään ratkaisemaan esille tulevat toteutuksen kannalta ongelmalliset tilanteet. Työn alkuvaiheessa esille tulleita haasteita ovat muun muassa tilaoptimoinnin tarve tekniseen tilaan sijoitettavien komponenttien suuren koon vuoksi ja teknisen tilan lämpötilan hallinta.

Työssä tehdään myös lyhyt katsaus kylmähoitoyksikön kehityskohteisiin. Mahdollisia kehityskohteita ovat esimerkiksi lämmenneen typen talteenotto ja liikuteltavan, eli niin kutsutun mobiiliyksikön, toteuttamismahdollisuuksien kartoittaminen.

1.4 Työn rakenne

Lukujen 2, 3 ja 4 tarkoituksena on antaa lukijalle kuvaus kylmähoitoyksikön teknisestä toteutuksesta ja työn suorituksen kannalta keskeisestä termodynaamisesta ja kylmäteknisestä teoriasta. Luvut 5, 6 ja 7 käsittelevät työn toteutusta ja saatuja tuloksia sekä näiden pohjalta tehtyjä johtopäätöksiä.

2. LÄMPÖTEKNINEN TEORIA

Luvun tarkoituksena on antaa lukijalle käsitys termodynaamisesta perustasta, johon työ pohjautuu. Käsiteltävinä aihealueina ovat termodynamiikan perusteet (luku 2.1) ja lämmönsiirto (luvut 2.2 ja 2.3).

Perusteiden hallinta on tärkeää, jotta ymmärretään kylmäaineiden käyttäytymistä kylmäkoneiston osana. Lisäksi aineiden kemiallis-fysikaalisen käyttäytymisen tunteminen on tärkeää. Koska kokovartalon huippukylmähoidossa lämpötilat ovat matalampia kuin perinteisessä pakkasvarastojen suunnitteluun keskittyvässä kirjallisuudessa, on laskentaa helpottavia kirjallisuusarvoja saatavilla hyvin niukasti. Myös edellä mainitusta syystä termodynaamisen perustan ymmärtäminen on hyvin tärkeää, jotta voidaan arvioida laskennalla saatujen tulosten todenmukaisuutta.

2.1 Termodynamiikan perusteet

Termodynamiikan perustana on termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö eli energian säilymisen laki:

$$\Delta U_{12} \left[\frac{kJ}{kg} \right] = U_2 - U_1 = Q_{12} + W_{12} \quad (1)$$

joka tarkoittaa käytännössä sitä, että systeemiin viety lämpö Q_{12} ja tehty työ W_{12} lisäävät systeemin sisäenergiaa U määrällä ΔU_{12} . Jos systeemiin ei tehdä työtä, on sisäenergian muutos yhtä suuri kuin viety lämpö. Kylmätekniikassa tällainen prosessi on esimerkiksi vakiopaineessa tapahtuva kylmäaineen höyrystyminen. Jatkuva toimisten laitteiden käsittelyn helpottamiseksi on otettu käyttöön suure, *entalpia*, h , joka määritellään

$$h = u + pv \quad (2)$$

jossa u on aineen sisäenergia yksikössä [kJ/kg], p on systeemin paine [Pa] ja v on aineen ominaistilavuus eli tiheyden ρ käänteisarvo [m³/kg]. Kun yhtälöihin (1) ja (2) yhdistetään aineen massavirta \dot{m} ja teho P , saa yhtälö muodon

$$\dot{m}(h_2 - h_1) = P + \dot{\Phi} \quad (3)$$

jossa $\dot{\Phi}$ on systeemiin tuotu lämpövirta [W]. [11]

Aineen ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa on c_p [kJ/(kgK)]. Ominaislämpökapasiteetti kuvaa aineen entalpian muutoksen Δh suhdetta lämpötilan muutokseen ΔT eli

$$c_p = \Delta h / \Delta T \quad (4)$$

Kun aineen massa ja lämpötilan muutos tiedetään, on aineeseen siirtyvä tai siitä poistuva lämpömäärä

$$Q = c_p m \Delta T \quad (5)$$

Kylmähoitoyksikköä tarkastellessa tärkeitä aineominaisuuksia ovat myös höyrystymisen-
talpia $h_{höyr}$ ja sulamisentalpia h_{sul} . Näiden suureiden avulla lasketaan esimerkiksi kylmä-
tilassa olevan vesihöyryn härmistymiseen kuluva lämpömäärä ja tyypeen höyrystimessä
ja putkistossa sitoutuva lämpömäärä. Jos aineen jäähtymyksessä tai lämmityksessä tapah-
tuu faasimuutoksia, on aineeseen siirtyvä lämpö

$$Q = m(c_k \Delta T_k + h_{sul} + c_n \Delta T_n + h_{höyr} + c_h \Delta T_h) \quad (6)$$

jossa alaindeksit k , n ja h kuvaavat faaseja kiinteä, neste ja höyry tässä järjestyksessä. [11]

Kylmähoitotilan ilmaa ja kylmäaineena käytettävää tyypeä kaasumaisessa muodossaan
voidaan käsitellä niin kutsuttuina ideaalikaasuina, joille pätee

$$pV = NRT \quad (7)$$

jossa N on ainemäärä mooleina, R yleinen kaasuvakio 8,3143 kJ/(kmolK), T absoluuttinen
lämpötila ja V tilavuus. Paineen ollessa vakio pätee

$$\frac{V}{T} = vakio \text{ eli } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (8)$$

jossa alaindeksit 1 ja 2 kuvaavat alku- ja lopputilannetta vastaavassa järjestyksessä. [11]

2.2 Lämmönsiirto

Kylmähoitotilassa lämpöä siirtyy kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja luon-
nollisella konvektiolla. Johtumisella tarkoitetaan kiinteän rakenteen, esimerkiksi hoitoti-
lan eristekerroksen läpi tapahtuvaa lämmönsiirtoa. Säteilemällä lämpöä siirtyy eri lämpö-
tilassa olevien pintojen, kuten hoidettavan ihmisen ja hoitotilan seinämien välillä. Luon-
nollinen konvektio vaikuttaa kiinteän pinnan ja fluidin esimerkiksi hoidettavan ihmisen
ja hoitotilan ilman välillä. Lisäksi lämpöä siirtyy erilaisten laitekuormien vaikutuksesta
esimerkiksi ovia sulana pitävistä vastuksista ja valaistuksesta hoitotilaan. Laitekuormiin
ei oteta kantaa tässä luvussa vaan vasta työn myöhemmässä vaiheessa.

2.2.1 Johtuminen

Johtumisella tarkoitetaan kiinteän rakenteen läpi siirtyvää lämpöä. Kylmähoitotilan tapauksessa tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi hoitotilan seinät ja ovet.

Fourier'n lain mukaan lämmönsiirtyminen tasoseinämän, jonka paksuus on X [m] läpi, lasketaan yhtälöstä

$$q_{joht} = k\Delta T/X \quad (9)$$

jossa q_{joht} [W/m²] on lämpövirta pinta-alayksikköä kohti, k [W/(mK)] aineelle ominainen lämmönjohtavuus, ja ΔT lämpötilaero tasoseinämän yli [K]. Materiaalin lämpövastus R [Km²/W] lasketaan yhtälöstä

$$R = X/k \quad (10)$$

Sähkövastuksen kanssa yhtäläisesti voidaan myös lämpövastuksia kytkeä sarjaan. Tällöin on kyse peräkkäisistä eristekerroksista. Kerrokselliselle rakenteelle pätee

$$R = R_1 + R_2 + \dots R_n \quad (11)$$

jossa alaindeksit kuvaavat eri eristekerroksien lämpövastuksia. Materiaalin lämmönläpäisykerroin U saadaan lämpövastuksen käänteislukuna yhtälöstä

$$U = 1/R \quad (12)$$

Kun yhtälöt (9), (10) ja (12) yhdistetään, lämmönjohtumisyhtälö saa muodon

$$q_{joht} = U\Delta T \quad (13)$$

Kun tiedetään myös seinämän pinta-ala A [m²], saadaan laskettua seinämän läpi johtumalla siirtyvä lämpöteho Q_{joht} [W] yhtälöstä

$$Q_{joht} = UA\Delta T = UA(T_1 - T_2) \quad (14)$$

jossa T_1 ja T_2 ovat eristekerroksen ulkopintojen lämpötilat. [11]

2.2.2 Lämpösäteily

Kaikki pinnat lähettävät lämpösäteilyä. Kylmähoitotilan ollessa kyseessä merkittävin säteilylämmönlähde on hoitotilassa hoidettava ihminen, joka säteilee lämpöä hoitotilan rakenteisiin kuten oviin ja seinämiin. Tämän lisäksi hoitoyksikön ulkoseinämät vastaanottavat lämpösäteilyä ympäröiviltä pinnoilta.

Stefan-Boltzmannin lain mukaan mustan kappaleen lähettämä säteilyteho E_b on

$$E_b = \sigma T^4 \quad (15)$$

jossa σ on Stefan-Boltzmannin vakio $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ja T on kappaleen pinnan absoluuttinen lämpötila. Todelliset pinnat eivät kuitenkaan absorboi kaikkea niihin osuvaa säteilyä kuten musta kappale. Todellisille kappaleille onkin tarpeen korjata säteilytehon arvoa ottamalla laskentaan mukaan pintamateriaalille ominainen arvo, emissiviteetti ϵ , joka kuvaa kappaleen lähettämän säteilyn suhdetta samassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen säteilytehoon. Kun emissiviteetin lisäksi tiedetään myös kappaleen pinta-ala, voidaan todellisen, vakio­lämpötilassa olevan pinnan lähettämän säteilyn lämpöteho $Q_{\text{sät}}$ laskea yhtälöstä

$$Q_{\text{sät}} = A\epsilon\sigma T^4 \quad (16)$$

Kahden todellisen pinnan välisen säteilyn lämpöteho Q_{12} lasketaan yhtälöstä

$$Q_{12} = A_1\epsilon_1\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (17)$$

jossa alaindeksi 1 kuvaa säteilyä lähettävän ja alaindeksi 2 kuvaa säteilyä vastaanottavan pinnan ominaisuuksia ja tilaa. [12]

Jos kaikki kappaleen lähettämä säteily ei kohdistu pintaan, jota kohti säteilytehoa lasketaan, tulee säteilytehoa korjata näkyvyyskertoimella F [12]. Näkyvyyskerroin kuvaa säteilylähteestä johonkin pintaan osuvan säteilyn suhdetta säteilylähteen emittoimaan kokonaissäteilytehoon. Esimerkiksi kylmähoitotilassa seisova ihminen säteilee käsivarsista kylkiinsä ja päinvastoin. Tämä säteily määrä ei kohdistu ympäröiviin pintoihin ja tulee vähentää laskennassa. Näkyvyyskertoimella korjattuna yhtälö (17) saa muodon

$$Q_{12} = F_{12}A_1\epsilon_1\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (18)$$

Näkyvyyskertoimen tarkka arvioiminen analyyttisesti on hyvin haastavaa esimerkiksi ihmisen kaltaisille monimutkaisille kolmiulotteisille rakenteille, joten apuna on syytä käyttää simuloinnilla saatuja approksimaatioita.

2.2.3 Konvektio

Konvektio tarkoittaa pinnan ja liikkuvan fluidin eli kaasun tai nesteen välillä tapahtuvaa lämmönsiirtoa. Kylmähoitotilassa lämpöä siirtyy konvektiolla hoitotilan ilmaan tilassa hoidettavista ihmisistä ja hoitotilan seinämien sisäpinoista. Koska hoitotilan ilma ei ole pakotetussa virtauksessa, on kyse luonnollisesta konvektiosta. Luonnollisessa konvektiossa ilman virtaus aiheutuu lämpötilan muutoksen aiheuttamasta tiheyden muutoksesta. Lämmennyt, kevyempi ilma alkaa nosteen vaikutuksesta liikkua ylöspäin, kun taas vastaavasti viileämpi ilma liikkuu alaspäin.

Luonnollisen konvektion laskennassa käytetään eräitä dimensiottomia lukuja laskennan apuna. Näitä dimensiottomia lukuja ovat Rayleigh'n luku Ra , Grashofin luku Gr , Nusseltin luku Nu , Prandtin luku Pr ja Prandtin luvun funktio ψ .

Grashofin luku on

$$Gr = \beta \Delta T g \frac{L^3}{\nu^2} \quad (19)$$

jossa β on tilavuuden lämpötilakerroin, ideaalikaasulle $1/T$ eli absoluuttisen lämpötilan käänteisluku, ΔT fluidin ja pinnan välinen lämpötilaero, g gravitaatiokiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$, L lämmönsiirtopinnan karakteristinen pituus ja $\nu [\text{m}^2/\text{s}]$ fluidin kinemaattinen viskositeetti. Rayleigh'n luku voidaan laskea yhtälöstä

$$Ra = GrPr \quad (20)$$

jossa Prandtin lukuna käytetään fluidille kirjallisuudesta löytyvää taulukkoarvoa. Prandtin luvun funktio saadaan yhtälöstä

$$\psi = \left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{-16/9} \quad (21)$$

Churchill ja Chu [13] ovat määrittäneet pystysuoran pinnan luonnolliselle konvektiolle Nusseltin luvun korrelaatioita virtauksen ollessa laminaari tai turbulentti. Laminaarille virtaukselle ($Ra \leq 10^9$) Nusseltin luku lasketaan yhtälöstä

$$Nu = 0,68 + (Ra\psi)^{1/4} \quad (22)$$

ja turbulentille virtaukselle ($10^9 \leq Ra < 10^{12}$) yhtälöstä

$$Nu = 0,68 + 0,670(Ra\psi)^{1/4}(1 + 1,6 * 10^{-8}Ra\psi)^{1/12} \quad (23)$$

Kadambi ja Drake [14] ehdottavat Millsin [12] mukaan vaakasuoralle, alaspäin suunnatulle pinnalle, jota lämmitetään, ja ylöspäin suunnatulle pinnalle, jota jäähdytetään Nusseltin luvun korrelaatioksi

$$Nu = 0,82Ra^{1/5} \quad (24)$$

kun $10^5 < Ra < 10^{10}$. Vastaavasti Corcione [15] suosittelee ylöspäin suunnatulle pinnalle, jota lämmitetään, tai alaspäin suunnatulle pinnalle, jota jäähdytetään, Nusseltin luvun korrelaatioksi

$$a) Nu = 1,05Ra^{0,215} \quad b) Nu = 0,9Ra^{0,23} \quad (25)$$

Ensimmäinen yhtälöistä (a) on neliöpinnan ja jälkimmäinen (b) suorakulmaisen pinnan Nusseltin luvun korrelaatio. Karakteristisena mittana käytetään suorakulmaisen seinämän tapauksessa lyhyemmän sivun pituutta.

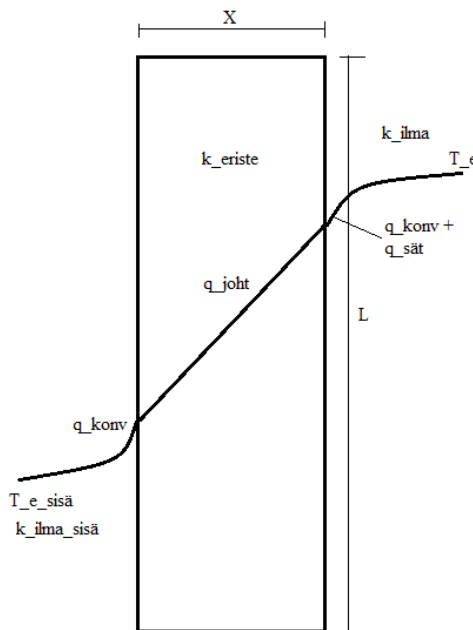
Kun Nusseltin luku tiedetään, voidaan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin h_c laskea yhtälöstä

$$h_c = \frac{k}{L} Nu \quad (26)$$

jossa k on fluidin lämmönjohtavuus. Kun tiedetään konvektiivisen lämmönsiirtopinnan pinta-ala sekä fluidin että pinnan lämpötilat, tulee konvektiivisen lämpötehon yhtälöksi

$$Q_{konv} = h_c A (T_p - T_e) \quad (27)$$

jossa Q_{konv} on konvektiolla siirtyvä lämpöteho, T_p on konvektiopinnan ja T_e pintaa ympäröivän fluidin lämpötila [12]. Kuvassa 2 on esitetty yhdistetyn lämmönsiirron periaate ja stationäärin tilan lämpötilajakauma yksinkertaiselle eristerakenteelle. Suurin lämpötilagradientti muodostuu eristerakenteeseen, kylmähoitotilassa erityisesti polyuretaanieristekerrokseen.



Kuva 2. Yhdistetyn lämmönsiirron periaate ja lämpötilajakauma stationäärissä tilassa. Suurin lämpötilagradientti syntyy eristekerrokseen.

Kuvassa 2 q lisämääreineen kuvaa eri lämmönsiirtotapojen aiheuttamia lämpövirtoja pinta-alayksikköä kohti. Stationäärissä tilanteessa lämpövuoto on kaikkien pintojen yli yhtä suuri. Tämä tarkoittaa sitä, että sisäpinnalla tapahtuva konvektiivinen lämpövuoto on yhtä suuri kuin eristeen yli johtumalla oleva lämpövuoto, joka on vastaavasti yhtä suuri kuin ulkopinnalla konvektion ja säteilyn aiheuttama lämpövuoto yhteensä.

2.3 Epästationäärin lämmönsiirron mallintaminen

Stationäärillä lämmönsiirrolla tarkoitetaan sitä, että tutkittavan lämmönsiirtotilanteen eri osat ovat näille ominaisessa tasapainotilassa. Tällaisesta tilanteesta on kyse esimerkiksi silloin, kun hoitotila on ollut hyvin pitkään päällä ja eristekerroksen lämpötilajakauma on vakiintunut. Myös ennen hoitotilan käyttöönottoa eristerakenne on tasapainotilassa. Tällöin koko eristerakenne ja sen pinnat ovat ympäristön lämpötilassa eikä lämmönsiirtoa tapahdu.

Epästationäärissä tilanteessa lämmönsiirrossa tapahtuu muutoksia ajan suhteen. Näitä muutoksia ovat esimerkiksi hoitotilan jäädyttäminen ympäristön lämpötilasta tavoitelämpötilaan ja lämpötilan nousu, kun hoitotilan käyttö lopetetaan. Tällöin esimerkiksi lämmönsiirtokertoimet saattavat muuttua ajan suhteen.

Kuten aiemmin esitetyistä lämmönsiirron yhtälöistä huomataan, riippuvat lämpövirta ja lämpövuoto voimakkaasti lämpötilaerosta lämmönsiirtopintojen välillä. On siis syytä olettaa, että hoitotilassa lämmönsiirto on voimakkaimmillaan ajan hetkellä, jolloin tavoitelämpötila -110 °C on juuri saavutettu, sillä tällöin lämpötilaero hoitotilan ja hoitotilan sisäpinnan välillä on suurimmillaan. Tämän jälkeen eristerakenteen lämpötilajakauma pyrkii tasoittumaan kohti stationääritilaa, ja lämpökuorma pienenee.

Epästationääriä tilannetta mallinetaan työssä differenssimenetelmällä (FDM (engl. finite-difference method)). Työn FDM-laskenta perustuu lähteeseen [12]. FDM-laskennassa apuna käytetään lämpötilan muutoksen nopeutta kuvaavia dimensiottomia muuttujia, Fourier'n lukua Fo ja Biotin lukua Bi . Fourier'n luku saadaan yhtälöstä

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (28)$$

jossa α on terminen diffusiviteetti [m^2/s], Δt valittu aika-askel ja Δx valitun verkon pituusaskel. Biotin luku saadaan yhtälöstä

$$Bi = \frac{h_c \Delta x}{k} \quad (29)$$

Differenssimenetelmän eksplisiittisessä muodossa johtumisen aiheuttama lämpötilan muutos verkon sisäisessä pisteessä lasketaan yhtälöstä

$$T_0^{i+1} = Fo(T_1^i + T_2^i) + (1 - 2Fo)T_0^i \quad (30)$$

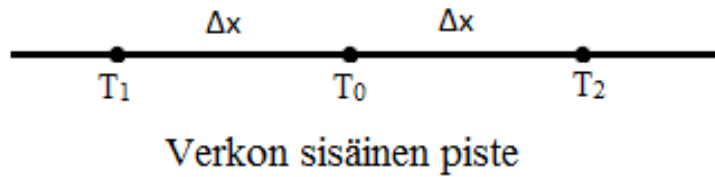
ja konvektion aiheuttama lämpötilan muutos materiaalin pinnalla yhtälöstä

$$T_0^{i+1} = 2Fo(T_1^i + BiT_e^i) + (1 - 2Fo - 2FoBi)T_0^i \quad (31)$$

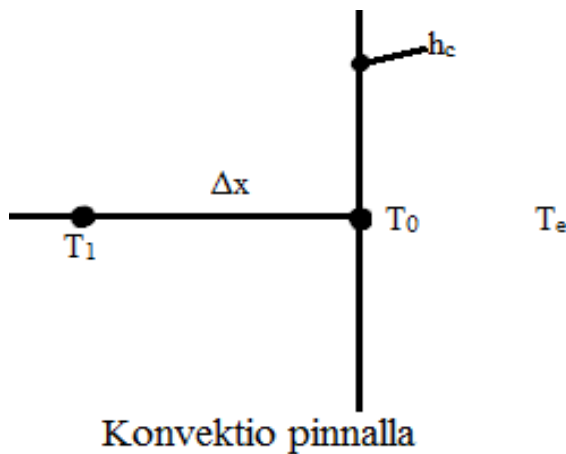
Eristekerrosten rajapintojen lämpötiloja laskettaessa oletetaan rajapinnalle tulevan lämpövuon olevan yhtä suuri kuin siltä lähtevä lämpövuoto, eli yhtälön (9) mukaisesti

$$q_1 = q_2 \quad \rightarrow \quad k_1 \frac{T_1 - T_0}{\Delta x_1} = k_2 \frac{T_0 - T_2}{\Delta x_2} \quad \rightarrow \quad T_0 = \frac{k_1 \Delta x_2 T_1 + k_2 \Delta x_1 T_2}{k_2 \Delta x_1 + k_1 \Delta x_2} \quad (32)$$

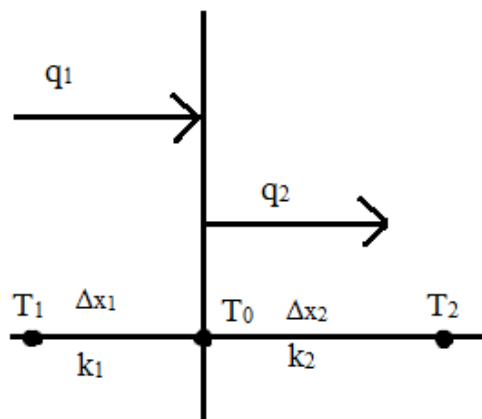
Yhtälöissä (30), (31) ja (32) alaindeksit kuvaavat pisteiden sijaintien suhteita ja yläindeksit kuvaavat eri aika-askeleita. Kuvat 3,4 ja 5 havainnollistavat edellä mainittuja yhtälöitä. Δx_2



Kuva 3. Lämmön johtuminen differenssimenetelmässä.



Kuva 4. Konvektio differenssimenetelmässä.



Kuva 5. Eristekerroksen rajapinnan laskenta differenssimenetelmässä.

Eksplisiittistä ratkaisumenetelmää käytettäessä Fourier'n luvun ja Biotin luvun on täytettävä yhtälöistä (28)...(31) määrittyvät stabiilisuusehdot. Stabiilisuusehdot on esitetty alla:

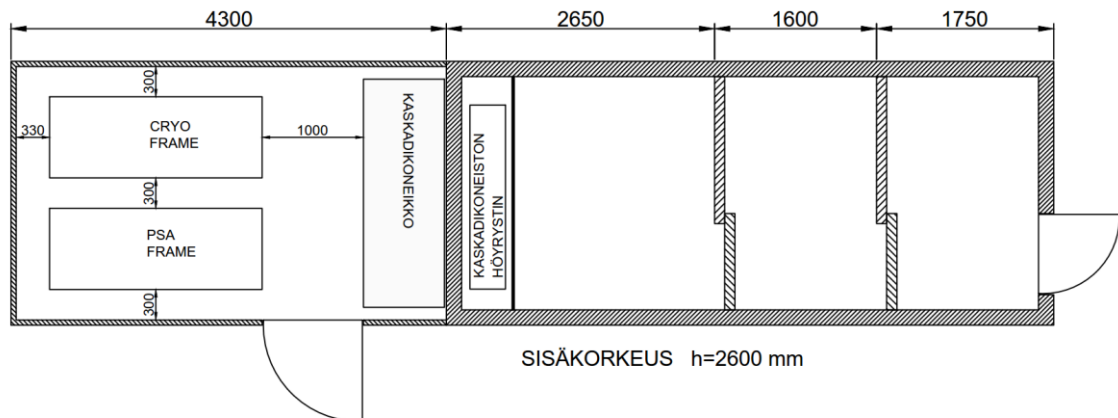
- Johtuminen: $Fo \leq \frac{1}{2}$
- Konvektio: $Fo \leq \frac{1}{2(1+Bi)}$

Eksplisiittisellä ratkaisumenetelmällä saadaan ratkaistua seuraavan aika-askeleen lämpötilat aina, kun edellisen aika-askeleen lämpötilat ovat tiedossa.

3. KYLMÄHOITOYKSIKKÖ

Tämän luvun tarkoituksena on antaa lukijalle johdantoa tarkempi kuva kylmähoitoyksikön toteutuksesta. Luvussa käydään läpi kylmähoitotilassa käytettävät materiaalit, komponentit ja kylmätekniikka. Kylmähoitoyksikön havainnollistus on esitetty kuvassa 1 ja standardimallin pohjapiirustus kuvassa 6. Kylmähoitoyksikkö on suunniteltu kooltaan sellaiseksi, että se on mahdollista kuljettaa maantiekuljetuksena kuljetuskonttiin asennettuna. Standardimalli on suunniteltu siten, että se on mahdollista asentaa ulos. Tällöin kaskadikoneiston lauhduttimet sijaitsevat kontin katolla. Liitteessä A on esitelty standardiratkaisusta hieman poikkeavia kylmähoitoyksikön toteutusratkaisuja. Näiden konfiguraatioiden on tarkoitus olla paremmin käyttötarkoitukseen sopivia, jos ulkoasennusta ei ole mahdollista tehdä, vaan laitteisto sijoitetaan valmiiseen huoneistoon.

Kylmähoitoyksikkö sisältää teknisen tilan lisäksi kolme erillistä huonetta: tuulikaapin, välitilan ja varsinaisen hoituhuoneen. Hoituhuoneiden lämpötilat ovat $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$, edellä mainitussa järjestyksessä, hoitoyksikön ollessa käytössä. Kulku tilojen välillä tapahtuu liukuovien kautta. Varsinainen kylmähoito toteutetaan niin, että asiakas siirtyy hoitotilan ulkopuolelta tuulikaappiin, jossa totutellaan kylmään esimerkiksi 20 sekuntia. Totuttelun jälkeen asiakas siirtyy välitilan kautta hoituhuoneeseen, jossa ollaan noin kolme minuuttia. Tämän jälkeen asiakas poistuu hoitotilasta samaa reittiä, jota tilaan tultiin. Kerralla hoidettavia asiakkaita voi olla korkeintaan viisi.



Kuva 6. Kylmähoitoyksikön pohjapiirros. Kuvassa vasemmalta oikealle ovat tekninen tila, hoituhuone, välihuone ja tuulikaappi.

3.1 Eristystekniikka

Kylmähoitoyksikön katto, lattia ja seinät koostuvat ilman välisaumoja toteutetusta yhtenäisestä moduulista. Kylmähoitotilan ulkoseinämissä eristemateriaalina käytetään um-

pisoluista polyuretaania, paksuudeltaan 150 mm, joka on päällystetty sekä ulko- että sisäpinnalta 9 mm:n paksuisella filmivanerilla. Väliseinissä eristepaksuus on 100 mm. Katto ja seinät päällystetään väriltään valkealla filmivanerilla ja lattia liukastumisen estävällä ruskealla ns. ”mehiläiskennovanerilla”. Laminointiliimana käytetään Kiilto Oy:n kaksikomponenttiliimaa, joka sallii lämpölaajenemisen ja -supistumisen vielä kylmähoitotilan vaatimalla pakkasalueella.

Tekninen tila (kuvassa 6 vasemmalla) on eristetty siten, että seinät ovat 50 mm:n paksuista polyuretaania, joka on päällystetty ulko- ja sisäpuolelta muovitetulla teräspellillä. Teknisen kontin lattia on 30 mm paksua ruskeaa filmivaneria.

3.2 Ovet, kulkuaukot ja ikkunat

Käyntiovi (kuvassa 6 oikealla) on joko saranoitu ovi tai liukuovi. Oven karmit on varustettu itsesäätyvillä lämpövastuksilla, joiden lämmitysteho on 60 wattia. Vastuksilla estetään oven jäätyminen kiinni. Hoitoyksikön tilojen välissä on kaksi liukuovea, jotka on ripustettu teflonrissoilla kiinni yläpuoliseen kiskoon. Ovien alapuolella on ovien liukumista ohjaavat ohjausrullat. Hoitotilan nopea ja voimakas jäähdyttäminen aiheuttaa tilaan suuren alipaineen verrattuna tilan ulkopuoliseen ilmaan. Tästä syystä hoitotilan ovet eivät saa olla täysin tiiviit, jotta lisäilmaa pääsee vapaasti virtaamaan hoitotilaan tasoittaen syntynyttä paine-eroa. Ovien väljät toleranssit ehkäisevät myös ovien kiinnijääytymistä. Ovissa on lisäksi ilman sisään virtaamista helpottavat ilma-aukot (halkaisija 120 mm), jotka on porattu oveen. Ilma-aukot mahdollistavat myös hoitotilan ilman ulosvirtauksen, kun ilma tilassa lämpenee esimerkiksi hoitotilan käytön loppuessa. Ilma-aukot toimivat samalla ovien avaamista ja sulkemista helpottavina kädensijoina. Hoitotilan ikkunoina käytetään 60x60 cm langatonta lämpölasia.

Teknisen tilan ovi on kuvan 6 mukainen saranaovi. Oven sijoittelu valitaan teknisen tilan toteutuvien mittojen ja sisäpuolisen laitteiston sijoittelun mukaan.

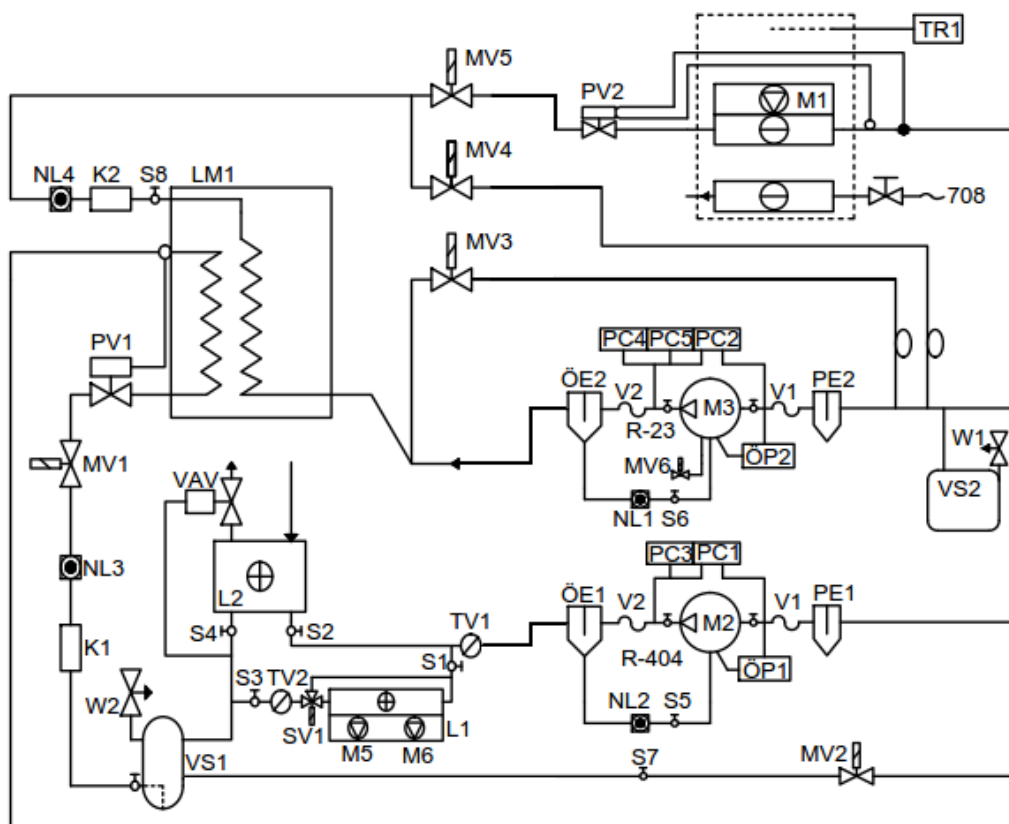
3.3 Kylmätekniikka

Kylmähoitotilaa jäähdytetään yhdistetyllä sähkökaskadi- ja nestetyyppiprosessilla. Kaaviokuva käytettävästä laitteistosta on esitetty kuvassa 7. Taulukossa 1 on selitetty kaaviossa käytettävät lyhenteet tärkeimpien komponenttien osalta.

Kylmähoitotilan pakkanen tuotetaan aluksi sähkökaskadikompressoritekniikalla. Käyttämällä ilmaa jäähdyttävänä kylmäaineena esimerkiksi R23:a päästään -90 °C lämpötilaan. R23:n vaihtoehtona voidaan käyttää R508B:tä, jolla saavutetaan jopa -120 °C lämpötila. Jäähdytysprosessi on kaksi- tai kolmeportainen suljettu kierto. Korkeapainepuolen kylmäaineena voidaan käyttää esimerkiksi R404A:ta. Kun sähkökaskadiprosessilla on saavutettu -85 °C lämpötila, suljetaan kaskadikierto ja kylmäaine kerätään putkistosta takaisin kaasusäiliöön.

Kun putkisto on tyhjä, käynnistetään nestetyypikierto. Lämpötilassa $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ oleva neste-typpi ohjataan höyrystimelle. Hoituhuoneen sisäilman voimakkaan jäähtymisen seurauksena kosteaa lisäilmaa alkaa virrata ovien ilma-aukoista hoituhuoneeseen. Tällöin lisäilmassa oleva vesihöyry härmistyy muodostaen mikroskooppisen pieniä jääkiteitä. Hoitotilan ilman sisältämä jääkidesumu mahdollistaa sen, että hoitotilan ilmaa on mahdollista hengittää ilman kasvomaskia.

Typpihöyrystimiä on yhteensä kolme sarjaan kytkettynä. Ensimmäiset kaksi höyrystintä sijaitsevat varsinaisessa hoituhuoneessa ja yksi höyrystimestä on välihuoneessa. Välihuoneen höyrystimestä poistuessaan typpi on täysin höyrystynyt. Höyrystinten lisäksi tuulikaapissa on typpipatteri, jossa kaasumainen typpi lämpenee edelleen sitoen lämpöä kylmätilasta. Tämän jälkeen typpi poistuu putkiston kautta noin -100 -asteisena ulkoilmaan.



Kuva 7. Kylmäkoneiston yksityiskohtainen laitteistokaavio [16].

Taulukko 1. Kuvan 6 selitteet tärkeimpien komponenttien osalta.

M2	Kompressori, korkealämpötilapiiri
M3	Kompressori, matalalämpötilapiiri
L1, L2	Korkealämpötilapiirin lauhduttimet
LM1	Kaskadilämmönsiirrin (lauhdutin-höyrystin)
M1	Höyrystin (matalalämpötilapiiri)
PV1, PV2	Paisuntaventtiilit
S1...S8	Sulkuventtiilit
708	Putki nestetyypisäiliölle

3.4 Lämpökuormaa aiheuttavat laitteet

Kylmähoitotilassa syntyy erikokoisia lämpökuormia kylmähoitotilan teknisten laitteiden vaikutuksesta. Laitekuormista merkittävimmät ovat valaistus ja ovia sulana pitävät vastukset. Ovivastukset ja valaisimet tuottavat yhteensä noin 100 wattia lämpökuormaa. Nestetyyppihöyrystimet toimivat luonnollisella ilmakierrolla. Luonnollisen ilmakierron höyrystimet eivät kuluta sähköä, eivätkä täten tuota kylmätilaan lämpökuormaa. Sähkökaskadijärjestelmä on mitoitettu Oy Cryon Ltd:n alihankkijan toimesta. Kaskadikompressorijärjestelmä tehonkulutus on sen päällä ollessa noin 15-20 kW. Tämän lisäksi nestetyyppikompressorin tehonkulutus on järjestelmävalinnasta riippuen noin 17-29 kW. Nämä lämpökuormat muodostuvat tekniseen tilaan. Nestetyyppijärjestelmä on päällä läpi vuorokauden ja kaskadikompressorijärjestelmä kylmähoitoyksikön jäähdyttämisen alkuvaiheessa noin 2-4 tuntia. Näin ollen jatkuva lämpökuorma tekniseen tilaan on vähintään 17 kW ja maksimilämpökuorma jopa lähes 50 kW. Tekniseen tilaan muodostuvaa lämpökuormaa voidaan pienentää, jos nestetyyppikompressorin lämmennyt ylijäämäilma saadaan puhallettua suoraan ulos teknisestä tilasta.

3.5 Liikuteltava yksikkö ja erilaiset asennuskohteet

Kuvan 6 mukainen standardimallinen kylmähoitoyksikkö on suunniteltu siten, että se voidaan asettaa yhdistelmäajoneuvon päälle ja kuljettaa maantiekuljetuksena. Tarvittaessa yksiköstä voidaan jättää toinen esihuoneista pois tilan säästämiseksi. Konttiin on lisäksi mahdollista asentaa sivuilta leviävät ulokkeet, jotka toimivat asiakastiloina, kun hoitoja ryhdytään antamaan. Tällöin yhdellä kuljetuksella on mahdollista siirtää kaikki hoitoyksikön vaatima laitteisto. Standardimallinen kylmähoitoyksikkö on suunniteltu säänkestäväksi, joten se on mahdollista toteuttaa täysin ulkoasenteisena. Kylmähoitoyksikön asentaminen ulos joko liikuteltavana tai pysyvänä yksikkönä on toteutustapana yksinkertaista.

Jos kylmähoitoyksikkö halutaan asentaa sisätilaan, esimerkiksi valmiiseen rakennukseen, tulee asennuksesta hieman monimutkaisempi kokonaisuus. Tällöin kylmähoitoyksikköä

ei voida tuoda paikalle valmiina konttina, vaan yksikkö on rakennettava kokonaan asennuskohteessa. Lisäksi haasteeksi voi tulla kaskadikoneikon lauhdutinasennuksen vaikutus julkisivuarkkitehtuuriin. Standardimallisessa kylmähoitoyksikössä lauhdutyksikkö on sijoitettu asennuskontin katolle, mutta erityisesti monikerroksisen rakennuksen kysessä ollessa kattoasennus ei välttämättä ole mahdollinen ilman pitkiä putkituksia, jotka saattavat kasvattaa asennuskustannuksia. Julkisivuarkkitehtuurin ohella erittäin tärkeä huomioon otettava seikka on teknisen tilan riittävän ilmanvaihdon varmistaminen. Stirling-laitteiston vaatima teknisen tilan minimi-ilmanvaihto on $2000 \text{ m}^3/\text{h}$, jotta varmistetaan teknisen tilan ilman pysyminen sekä riittävän viileänä että hengityskelpoisena. Rakennuksesta riippuen edellä mainitun ilmanvaihdon järjestäminen voi vaatia erillisen ilmanvaihtokoneen asentamista.

Edellä mainittujen asennuskohteiden lisäksi mahdollisia kohteita ovat myös luksusristeilijät. Stirling Cryogenicsin nestetyypilaitteistoja ja kaskadikompressorijärjestelmiä käytetään laivoissa [17; 18], joten niiden toiminnan suhteen ongelmia ei pitäisi ilmetä. Edellisessä kappaleessa esitetyt haasteet pätevät kuitenkin myös risteilyaluksen tapauksessa. Erityisesti tilaoptimoinnin tarve voi olla suuri.

4. KYLMÄHOITOTILAN JÄÄHDYTYS

Työn aiheena olevan kylmähoitotilan jäähdytys toteutetaan sähkökaskadikompressorijärjestelmän ja nestetypen avulla niin, että sähkökaskadi jäähdyttää tilan noin $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan, minkä jälkeen sähkökaskadijärjestelmä sammutetaan ja nestetypen syöttö nestetypihöyrystimille alkaa. Nestetypellä hoitotila jäähdytetään tavoitelämpötilaan, $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen, ja ylläpidetään tässä lämpötilassa hoitotilan ollessa käytössä.

4.1 Jäähdytystehontarve

Kylmäteknisen laitteiston suunnittelu aloitetaan jäähdytystehontarpeen määrittämisellä, sillä jäähdytystehontarpeen perusteella suoritetaan tärkeimpien komponenttien, kuten kompressorien, höyrystinten ja lauhdutinten valinta [11]. Kylmähoitotilan tapauksessa tarvittava jäähdytysteho määritetään käyttäen huipputehon laskentaa, sillä kylmähoitotilan lämpökuormat eivät ole likimainkaan tasaisia, ja esimerkiksi kylmähoitotilan asiakastiheys (asiakasta/tunti) vaikuttaa hyvin paljon vaadittavaan jäähdytystehoon. Hoitotila on lisäksi käytössä korkeintaan noin kuusi tuntia yhtäjaksoisesti.

Koska asiakastiheys vaikuttaa hyvin voimakkaasti kylmähoitotilan jäähdytystehontarpeeseen, on jäähdytystehon laskennassa hyvä määrittää yksittäisen asiakkaan luovuttama lämpömäärä hoitokerran aikana. Tämän tiedon perusteella pystytään laskemaan eri asiakastiheyksien aiheuttamat lämpökuormat. Asiakkaiden ohella suurin kylmähuoneen lämpökuormista muodostuu seinämien läpi tulevasta lämmöstä. Edellä mainittujen lämpökuormien lisäksi kylmähoitotilassa on erilaisia lämpöä tuottavia laitteita, jotka muodostavat osan jäähdytystehontarpeesta. Näitä laitteita ovat esimerkiksi valaisimet ja ovia sulana pitävät lämpövastukset. Lämpökuormia syntyy myös kylmähoitotilan lisäilmassa olevan vesihöyryn härmistymisestä jääkiteiksi ja hoitotilan kulkuovien avaamisesta tilaan ja tilassa siirtymistä varten.

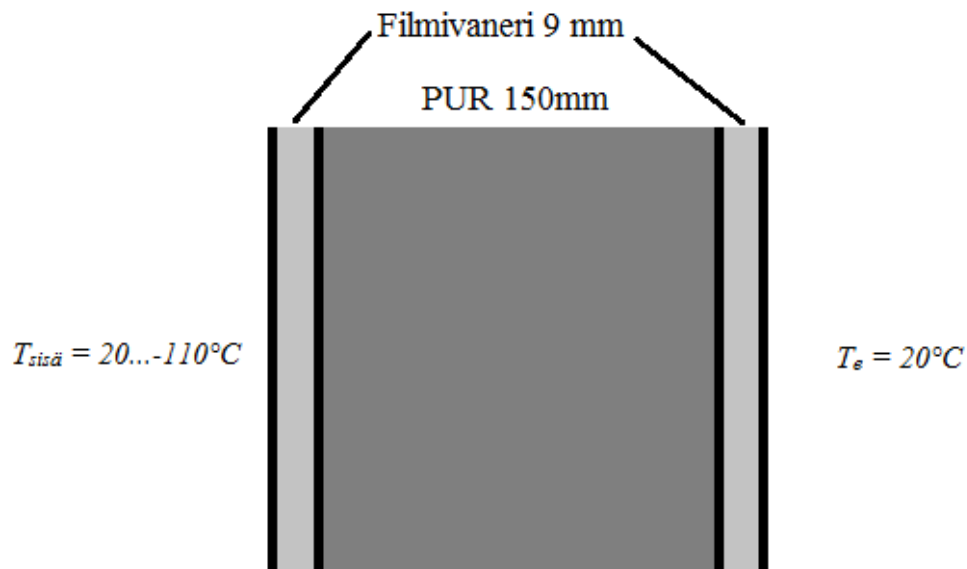
4.1.1 Seinämien kautta tuleva lämpökuorma

Hoitotilan seinämien kautta tulevan lämpökuorman laskemiseksi tarvitaan lähtötietoina hoitotilan rakenteiden mitat ja hoitotilan sisä- ja ulkopuoliset lämpötilat. Tämän lisäksi tulee tietää tiloja erottavien rakenteiden lämmönjohtavuudet tai lämmönsiirtokertoimet, eli niin sanotut U-arvot. Kylmähoitotilan seinät ovat 150 mm :n paksuista umpisoluista polyuretaania (PUR), joka on päällystetty sisä- ja ulkopinnoilta 9 mm :n paksuisella filmivanerilla [16]. Eristemateriaalien ominaisuuksia on koottu taulukkoon 2 ja havainnollistus käytettävästä eristerakenteesta on esitetty kuvassa 8.

Taulukko 2. Käytettävien eristemateriaalien aineominaisuuksia.

Ominaisuus/Materiaali	Polyuretaani (PUR) ⁽¹⁾	Filmivaneri (mänty) ⁽²⁾
Tiheys [kg/m ³]	35	500
Lämmönjohtavuus [W/mK]	0,023	0,10
Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]	1400	2800
Terminen diffusiviteetti [m ² /s]	$4,69 \cdot 10^{-7}$	$7,14 \cdot 10^{-8}$

(1) Lähde: [19], (2) Lähde: [12]



Kuva 8. Hoitoyksikön ulkoseinämien eristerakenne koostuu 150 mm paksuisesta polyuretaanilevystä, joka on päällystetty molemmin puolin 9 mm paksulla filmivanerilla.

Taulukon 2 tietoja käyttäen saadaan laskettua eristerakenteen lämmönläpäisykerroin yhtälöiden (10), (11) ja (12) avulla. Eristekerroksen ulkopinnoilta siirtyy lisäksi lämpöä konvektiolla ja säteilemällä. Pintojen lämmönsiirtokertoimien laskemiseksi käytetään yhtälöitä (18) ja (22). Kun lisäksi tiedetään lämpötilaero pintojen yli, saadaan laskettua lämpövuoto ympäristöstä hoitotilaan. Laskentaa varten on tärkeää huomata, että lämmönsiirtokertoimet riippuvat lämpötilaerosta eivätkä ole epästationäärissä tilanteessa vakioarvoja.

Seinämien kautta tulevaan lämpökuormaan vaikuttaa seinämien yli olevan lämpötilaeron lisäksi se, että seinämiin on varastoitunut lämpöä yhtälön (5) mukaisesti. Kun ympäröivän ilman lämpötila laskee alle eristerakenteen pintalämpötilan, alkaa eristerakenne luovuttaa siihen varastoitunutta lämpöä. Mitä pidempään kylmähoitotilaa pidetään tavoitelämpötilassa, eli -110 °C :ssa, sitä suuremman osan eristerakenne ehtii luovuttaa siihen varastoituneesta lämmöstä. Eristerakenteen lämpökapasiteetti on verrattain suuri suhteessa hoitotilan ilmaan eristerakenteen huomattavasti suuremmasta tiheydestä johtuen. Tästä syystä

merkittävän paljon nestetyppeä kuluu itse asiassa eristerakenteen jäähdyttämisessä kohti stationääriä tilaa.

4.1.2 Tilassa hoidettavien ihmisten aiheuttama lämpökuorma

Tilassa hoidettavat ihmiset luovuttavat tilaan lämpöä sekä säteilemällä tilan rakenteisiin että konvektiolla tilassa olevaan ilmaan. Lisäksi asiakkaiden uloshengittämä ilma tuo hoitohuoneeseen lämmintä kosteaa ilmaa. Asiakkaiden aiheuttama kuorma lasketaan yhtälöiden (18) ja (25) avulla. Oletuksena on, että hoidettavat henkilöt oleskelevat tilassa keskimäärin kolme minuuttia. Laskennan yksinkertaistamiseksi oletetaan lisäksi tilan ilman olevan tasaisesti $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$, ja asiakkaan keskimääräiseksi lämpötilaksi Westerlund et al. [20] mukaan $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Yksinkertaistus ei aiheuta laskentaan merkittävää virhettä, sillä konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ei muutu radikaalisti lämpötilaerojen ollessa konvektiopinnan ja ympäröivän ilman välillä $120\ldots 140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Säteilylämmönsiirron suhteen ei synny myöskään merkittävää virhettä. Edellä mainittujen lämmönsiirtotapojen lisäksi asiakkaat luovuttavat tilaan hieman lämpöä hengitysilman mukana.

Jotta yhtälöitä (18) ja (27) voidaan käyttää, tulee tietää ihmisen pinta-ala vähintään likimääräisesti. Arvioinnissa käytetään apuna Savolainen et al. [21] toteuttamaa ihon pinta-alanomogrammia. Asiakkaan referenssimittoina käytetään 180 senttimetriä pitkää, 80 kilogrammaa painavaa mieshenkilöä. Tällöin ihopinta-alaksi saadaan nomogrammista katsottuna 2,0 neliometriä. Asiakaslämpökuorman laskennassa oletetaan lisäksi konvektiivisen lämmönsiirron osalta asiakas likipitäen sylinterin malliseksi. Tällä yksinkertaistuksella saatuja tuloksia voidaan tarkastaa ja korjata Kurazumi et al. [22] simuloimilla tuloksilla. Yksi edellä mainituista tuloksista on luonnollisen konvektion vaikuttava pinta-ala suhteessa ihmisen kokonaispinta-alaan, joka on seisovalla ihmisellä noin 0,95. Seisovan ihmisen konvektiiviseksi lämmönsiirtokertoimeksi Kurazumi et al. [22] ovat saaneet

$$a) h_c = 1,007 * \Delta T^{0,406} \quad tai \quad b) h_c = 1,183 * \Delta T^{0,347} \quad (33)$$

Ensimmäinen yhtälö on jalat erillään ja kädet hieman keskivartalosta irti, ja jälkimmäinen kädet kiinni vartalossa ja jalat tiiviisti yhdessä seisovalle ihmiselle.

Säteilyn näkyvyyskertoimenä käytetään Manabe et al. [23] mukaan 0,8. Tulos on saatu simulaationa yksittäiselle seisovalle ihmiselle suljetussa tilassa. Jos hoidettavia ihmisiä on tilassa useita, pienenee yksittäisen ihmisen säteilyn näkyvyyskerroin, sillä tällöin ihmiset säteilevät lämpöä myös toisiinsa. Manabe et al:n [23] tuloksista arvioituna näkyvyyskerroin pienenee noin 0,3:lla ihmistiheyden ollessa $0,54\text{ henkilöä/m}^2$. Jos hoitohuoneen oletetaan olevan noin 6 m^2 , tarkoittaa edellä mainittu ihmistiheys noin kolmea henkilöä. Manabe et al. ovat simuloineet edellä mainitut näkyvyyskertoimen arvot tilassa keskimmäisenä olevalle ihmiselle suuremmilla ihmismäärillä kuin kylmähoitotilassa tulee olemaan, joten on oletettavaa, että näkyvyyskerroin ei pienene aivan yhtä paljon kuin

simulointitulos 0,3. Kolmella henkilöllä näkyvyyskerroin on todellisuudessa todennäköisemmin jotain 0,5 ja 0,8 väliltä. Viidellä henkilöllä 0,5 näkyvyyskertoimenä voi olla lähellä totuutta.

Asiakkaiden uloshengitysilman lämpökuormaa voidaan arvioida karkeasti seuraavin oletuksin. Aikuinen ihminen hengittää kevyen liikunnan aikana noin 20-25 litraa huoneenlämpöistä ilmaa minuutissa [24]. Tämän ilmamäärän massa on noin 24-30 grammaa minuutissa eli kolmen minuutin aikana noin 72-90 grammaa. *Popov et al.* [25] mukaan terveen ihmisen uloshengitysilman lämpötila on noin 35 °C hengitettäessä huoneenlämpöistä ilmaa. Hengitettäessä huippukylmää ilmaa, jonka lämpötila on noin -110 °C, ilma ei oletettavasti lämpene yllä mainittuun 35 °C:n lämpötilaan. Paremman tiedon puuttuessa käytetään kuitenkin referenssiarvona 35 °C:n lämpötilaa. Uloshengitysilmaa käsitellään täysin vesihöyryn kyllästämänä ilmana. Uloshengitysilman sisältämän vesihöyryn oletetaan härmistyvän täysin.

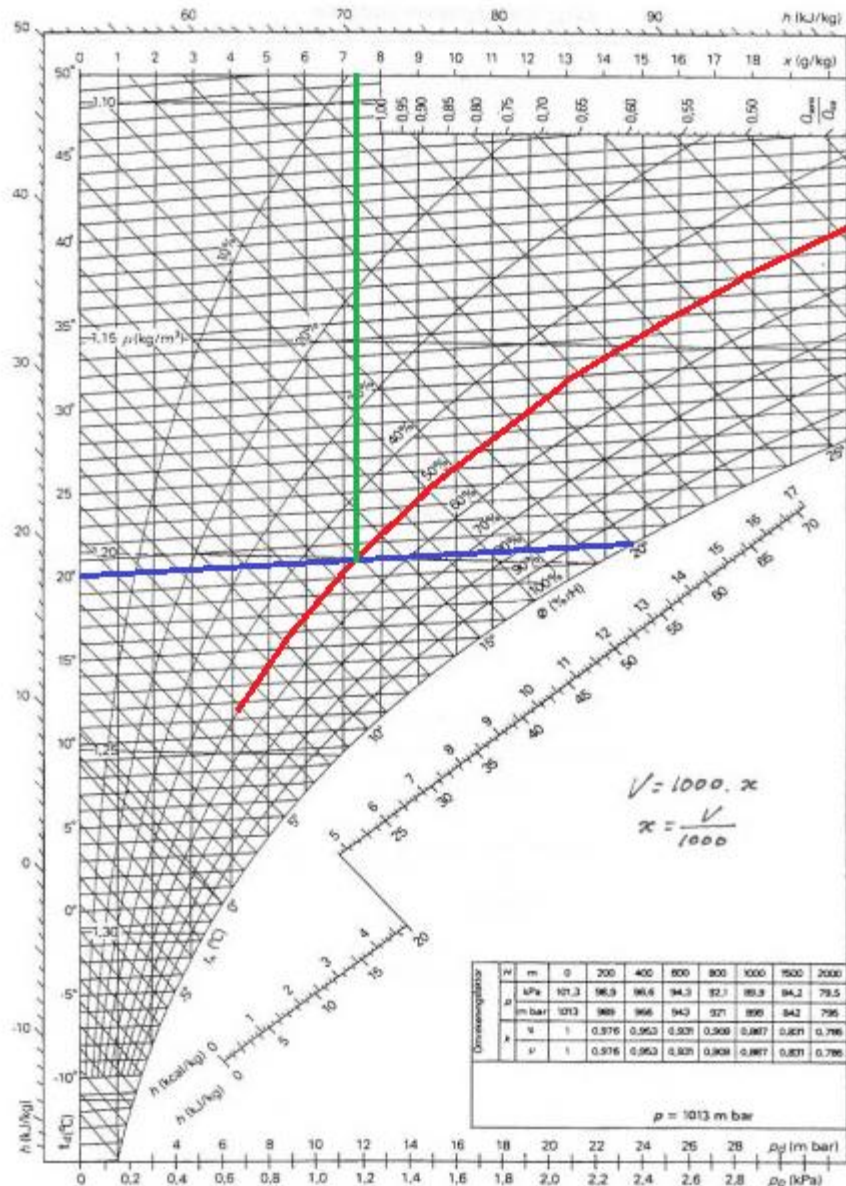
4.1.3 Lisäilma ja laitekuormat

Kun suljettua tilaa jäähdytetään voimakkaasti, syntyy tilaan alipainetta verrattuna tilaa ympäröivään ilmaan. Jos ympäröivän ilman ja tilan välillä on riittävän suuri aukko, tasoittuu tilojen välillä oleva paine-ero tilaan tulevan lisäilman vaikutuksesta. Hoitotilan jäähdyttämisen aikana tilaan siirtyvän lisäilman määrä on laskettavissa yhtälön (8) avulla. Tämän lisäksi ilma-aukot aiheuttavat tilaan syntyvää lämpökuormaa, sisäilman ollessa likimain vakioilämpötilassa. Aittomäen [11] mukaan ilma-aukon kautta tuleva lämpövirta voidaan laskea yhtälöstä

$$\Phi = A \rho_s c_{pi} K \sqrt{gH \left(1 - \frac{T_s}{T_u}\right)} (T_s - T_u) \quad (34)$$

jossa A on ilma-aukon pinta-ala, H on ilma-aukon korkeus, K on lämpötilajakauman korjauskerroin $0,48 + 0,004(T_u - T_s)$ ja alaindeksit s ja u kuvaavat aukon sisäpuolisen ja ulkopuolisen ilman ominaisuuksia vastaavassa järjestyksessä.

Lisäilman lämpökuorman laskennassa ilman suhteelliseksi kosteudeksi ϕ oletetaan noin 50 prosenttia. Kaiken ilmassa olevan kosteuden oletetaan härmistyvän. Tällöin yhtälön (6) avulla voidaan laskea kostean ilman tilaan aiheuttama lämpökuorma. Kuvassa 9 on esitetty Mollier-diagrammi, johon on piirretty lämpötilaa 20 °C ja suhteellista kosteutta 50 % vastaava absoluuttinen kosteus, joka on hieman yli seitsemän grammaa vettä ilmakiloa kohden. On syytä olettaa, että veden härmistymisen vaikutus kokonaislämpökuormaan lisäilman jäähdytyksessä ei ole kovin merkittävä, sillä veden massaosuus jäähdytettävässä ilmassa on melko pieni.



Kuva 9. Kostean ilman Mollier-diagrammi [26].

Voimakkaan lumisumun tuottaminen hoitotilaan on hoitotilan hengitysilman laadun kannalta erittäin tärkeää. Lumisumun tuotossa huoneenlämpöistä kosteaa ilmaa tuodaan hoitotilaan, jolloin ilman sisältämä vesihöyry härmistyy välittömästi jääkiteiksi. Lumisumutuotannon lämpökuorma voidaan laskea niin ikään yhtälöstä (6).

Laitekuormia hoitotilassa syntyy pääasiassa valaistuksesta ja ulko-ovea sulana pitävistä vastuksista. Näiden laitekuormien oletetaan olevan suuruusluokaltaan noin 100 wattia. Lisäksi sähköinen jäähdytysjärjestelmä ja nestetyppeä tuottava laitteisto aiheuttavat lämpökuormaa tekniseen tilaan. Nestetyppeä tuottavan kompressorijärjestelmän suurin toimintalämpötila on 45 °C, joten tekninen tila on toteutettava niin, ettei tämä lämpötila ylitä.

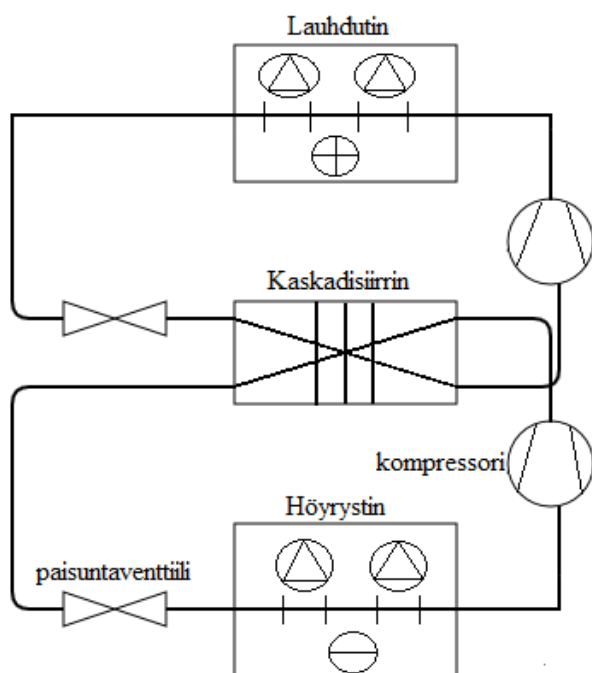
4.2 Jäähdytysprosessi

Hoitotila jäähdytetään sähkökaskadikompressorilla -85 °C :seen, minkä jälkeen loppu kylmä -110 °C asti tuotetaan paikan päällä valmistetun nestetyypen avulla. Lämpötila ylläpidetään -110 °C :ssa niin ikään nestetyypen avulla. Nestetyppi valmistetaan Stirling Cryogenicsin nestetyypikompressorilla. Jäähdytysprosessin yksi pääpiirteistä on lumisumun tarkoituksellinen tuottaminen hoitotilaan. Lumisumun tuotto tapahtuu tuomalla kosteaa lisäilmaa hoitotilan kylmään ilmaan. Tällöin lisäilmaan sitoutunut vesihöyry härmistyy hyvin pieniksi jääkiteiksi.

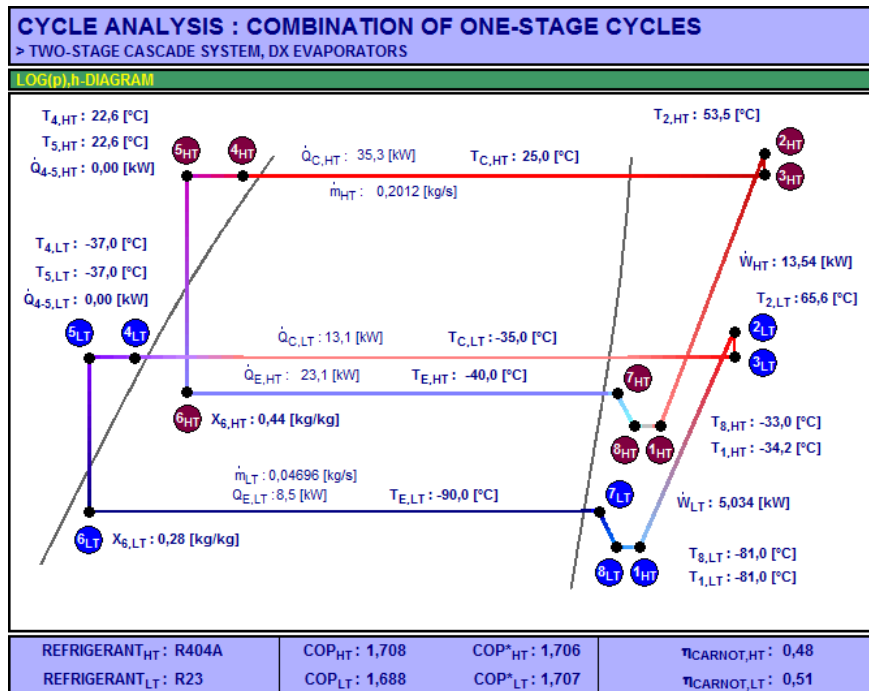
4.2.1 Kaskadikompressorijäähdytys

Kaskadijäähdytyksellä tarkoitetaan sitä, että jäähdytysjärjestelmässä on vähintään kaksi eri kylmäainekiertoa. Näiden kiertojen välillä on kaskadilämmönsiirrin, joka toimii korkealämpötilapiirin höyrystimenä ja matalalämpötilapiirin lauhduttimena. Yksinkertaistettu periaatekuva päälaitteista on esitetty kuvassa 10. Järjestelmä sisältää lisäksi huomattavan määrän säätö- ja varolaitteistoa, kuten aiemmin kuvassa 7 on esitetty.

Kylmähoitotilassa vaadittavat lämpötilat ovat huomattavasti kylmempiä kuin esimerkiksi pakkasvarastoissa, joten sopivia kylmäaineita on hyvin rajallisesti [27]. Matalalämpötilapiirissä käytettäväksi kylmäaineeksi sopivat esimerkiksi R23 tai R508B, joilla päästään tarvittavaan -85 °C lämpötilaan. Korkealämpötilapiirin kylmäaineeksi sopii esimerkiksi R404A. Kaskadiprosessin periaate on esitetty p,h-tasossa kuvassa 11. Kuvan 11 tilapisteet ovat kuvitteellisia eivätkä välttämättä vastaa hoitotilan todellista prosessia.



Kuva 10. Kaksiportaisen sähkökaskadijärjestelmän päälaitteet.



Kuva 11. Kuvitteellinen kaskadijähdytyskierto kylmäaineilla R404A ja R23 log p,h -tasossa. Prosessi on laskettu Coolpack-ohjelmistolla [28].

Tilan alkujäähdytys -85 °C:seen kestää noin 1,5 tuntia. Tänä aikana hoituhuoneen ilma kuivuu voimakkaasti, sillä ilman sisältämä kosteus jäätyy päästessään kosketuksiin höyrystimen tai tilan rakenteiden kanssa. Tällöin lumisumua ei juuri synny, sillä jää muodostuu pääasiassa höyrystimen pinnalle, tilan rakenteisiin tai putoaa lattialle lumena.

4.2.2 Nestetyyppijäähdytys

Nestetyyppiä käytetään hoituhuoneen jäähdyttämiseen noin -85 °C:sta -110 °C:seen. Nestetyypellä ylläpidetään lämpötila -110 °C:ssa.

Nestetyypen höyrystymispiste normaalissa ilmanpaineessa on -196 °C, höyrystymisentalpia noin 198 kJ/kg ja ominaislämpökapasiteetti 1,05 kJ/(kgK). Nestetyypen ominaisuuksia on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Nestetyypen ominaisuuksia [27].

Moolimassa	28,02 kg/kmol
Kiehumispiste normaali-ilmanpaineessa	-196 °C
Höyrystymislämpö	198 kJ/kg
Ominaislämpökapasiteetti (kaasu)	1,05 kJ/(kgK)
Tiheys (neste)	806 kg/m ³ ⁽¹⁾
Tiheys (kaasu)	1,17 kg/m ³ ⁽²⁾

(1) Normaali-ilmanpaine, kylläinen neste (2) Normaali-ilmanpaine, 20 °C

Edellä mainittujen ominaisuuksien ansiosta nestetyppi on hyvä valinta kylmäaineeksi, kun tavoitellaan alle $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötiloja. Nestetyypin alhainen höyrystyslämpötila mahdollistaa myös lumisumun tuoton hoitotilaan. Lumisumun tuottoa tarkastellaan yksityiskohtaisemmin luvussa 4.2.3.

Nestetyyppijäähdytys toteutetaan paikan päällä tuotetun nestetyypin avulla. Typpi erotellaan tekniseen tilaan tulevasta raitisilmasta ja nesteytetään. Typen nesteytysprosessi toteutetaan Stirling Cryogenicsin nestetyyppikompressorilla, joka toimii Stirling-kierrolla. Yksi työn tärkeimmistä tavoitteista on määrittää mittaluvut, jotta osataan valita mahdollisimman hyvin käyttötarkoitukseen sopiva nestetyyppikompressor. Tyypikuva nestetyyppikompressorista on esitetty kuvassa 12.

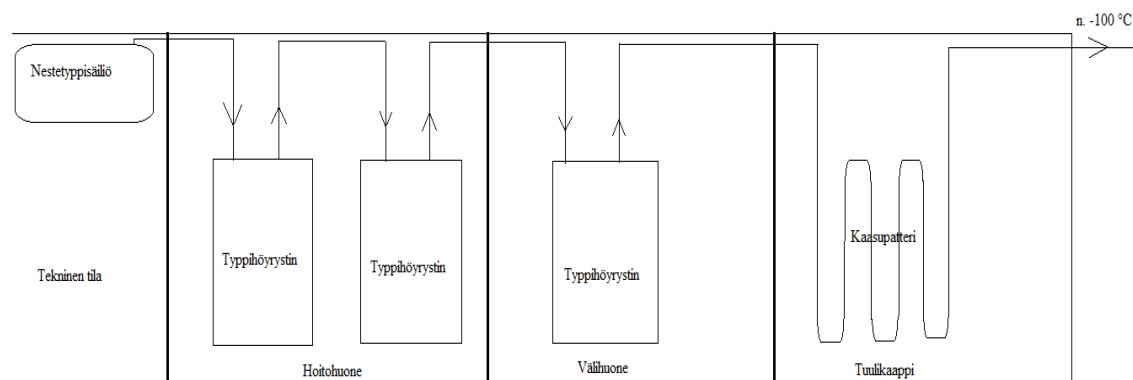


Kuva 12. Nestetyypen valmistamiseen käytettävä nestetyyppikompressor [29]. Kuvassa StirLIN Economy.

Tarkastelun lähtökohtana olevat nestetyyppikompressorit ovat StirLIN Economy ja StirLIN Compact. Nestetyypen vuorokausituotot ovat Economylla 120 litraa ja Compactilla 240 litraa. Näitä vuorokausituottoja käytetään laskennassa raja-arvoina, joille lasketaan käyttäjämäärän ja kylmähoitoyksikön käyttöajan mukaisia maksimiarvoja. Päivittäiset käytössä olevat nestetyyppimäärät ovat hieman suurempia kuin nestetyyppikompressorien päivätuotot, sillä kylmähoitoyksikkö ei ole käytössä viikonloppuisin. Viikonloppujen aikana nestetyyppisäiliö täyttyy vapaasti, sillä nestetyypeä ei kulu.

Nestetyypin avulla kylmää tuotetaan niin, että nestetyppi ohjataan säiliöstä höyrystimelle, joka sijaitsee hoituhuoneen katossa. Nestetyppi höyrystyy osittain ja ohjataan niin ikään hoituhuoneen katossa olevalla seuraavalle höyrystimelle. Tämän jälkeen typen nestehöyry-seos ohjataan hoitotilan välihuoneen katossa olevalle kolmannelle höyrystimelle, jossa typpi höyrystyy lopulta täysin. Kolmannen höyrystimen jälkeen tuulikaapissa on

vielä nestetyyppiputkisto/-patteri, jossa höyrystynyt typpi lämpenee jäädyttäen tuulikaapin ilmaa. Tämän jälkeen noin -100-asteinen typpi poistetaan ulkoilmaan. Järjestelmä on esitetty kuvassa 13.



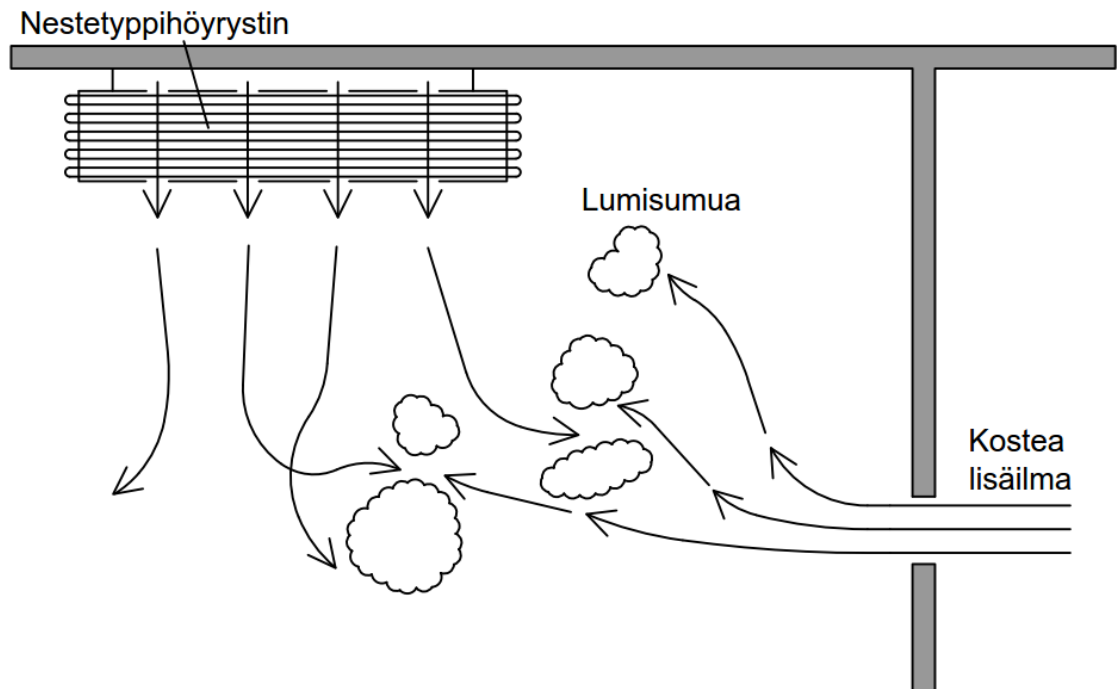
Kuva 13. Nestetyyppijärjestelmän asemointi kylmähoitoyksikössä. Höyrystimet ja kaasupatteri sijaitsevat hoitoyksikön katossa [16].

Kun oletetaan typelle noin 100 asteen lämpeneminen tuulikaapin kaasupatterissa, saadaan taulukossa 3 esitetyillä nestetyypen ominaisarvoilla typen entalpian muutokseksi jäädytysprosessissa noin 300 kJ/kg.

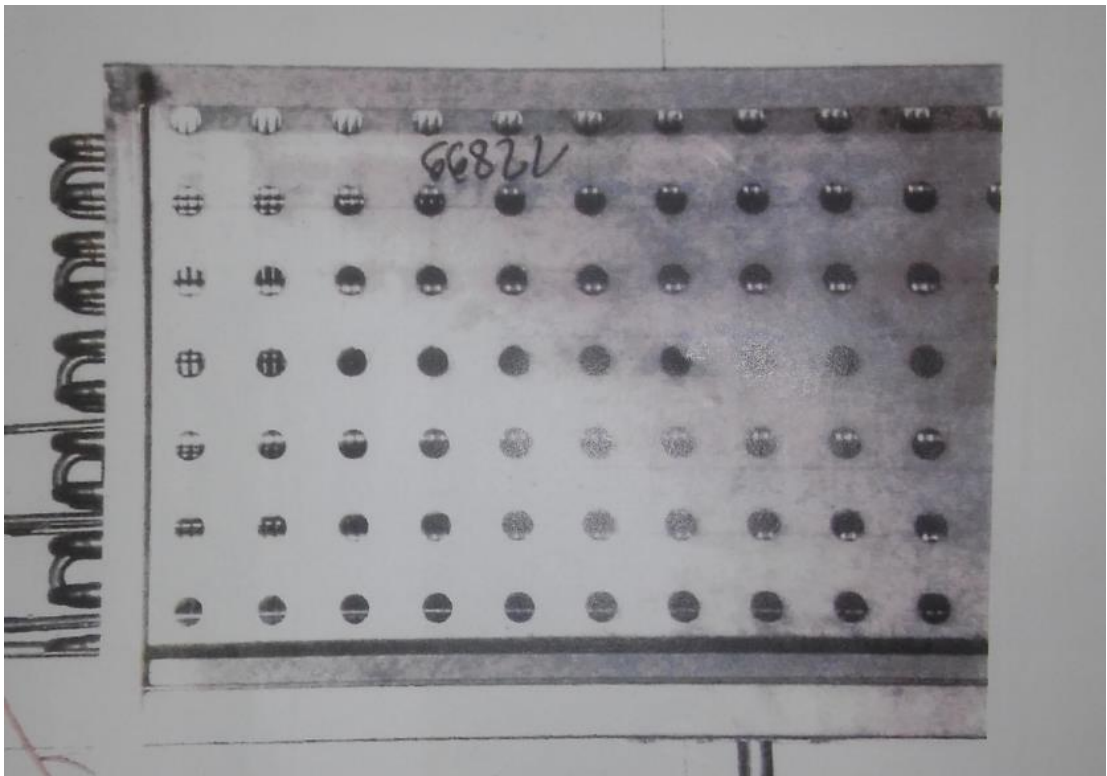
4.2.3 Lumisumun tuottaminen

Työn aiheena olevan kylmähoitotilan yksi tärkeimmistä ominaispiirteistä on se, että hoitotilaan tuotetaan tarkoituksella lumisumua eli mikrokiteistä jäää. Lumisumu on maksimaalisen hoitotuloksen kannalta erittäin tärkeää, sillä se mahdollistaa hoitotilan ilman hengittämisen ilman suun ja nenän peittävää hengityssuojainta. Huippukylmän ilman hengittäminen tehostaa kylmähoidon aikaansaamaa shokkireaktiota.

Lumisumun tuotto aloitetaan, kun tilaa aletaan jäädyttää nestetyypellä. Lumisumua tuotetaan niin, että kosteaa lisäilmaa tuodaan kylmähoitotilaan oviin porattujen ilma-aukkojen läpi. Lisäilman tuomiseksi ei tarvita erillistä laitteistoa, sillä lisäilmaa siirtyy hoitotilaan ulkopuolisesta ilmasta luonnostaan ilman jäähtymisen aiheuttaman, hoitotilan ja ulkoilman välille syntyvän paine-eron tasautuessa. Kostean lisäilman kohdatessa hoitotilan huippukylmän ilman härmistyy lisäilman sisältämä kosteus mikrokiteiseksi jääksi. Ilma-aukko on sijoitettava mahdollisimman etäälle nestetyyppihöyrystimestä. Tällä tavoin vältetään höyrystimen pinnalle härmistyvän jään muodostuminen, mikä on haitallista kylmähoitoyksikön toiminnan kannalta. Lumisumun tuottamisen periaatekuva ja kuva nestetyyppihöyrystimestä on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Lumisumua syntyy, kun kostea lämmin lisäilma sekoittuu tyypihöyrystimeltä tulevan hyvin kylmän ilman kanssa.



Kuva 15. Nestetyyppihöyrystin [16].

Lumisumun tarkoituksena on tuottaa hoitotilaan miellyttävää hengitysilmaa. Sosiaali- ja terveysministeriön (STM) vuoden 2003 suosituksen [30] mukaisesti huoneiston sisäilman

suhteellisen kosteuden tulee olla vähintään 20 %. Kuvan 9 Mollier-diagrammin mukaisesti edellä mainittu suhteellinen kosteus vastaa absoluuttisena kosteutena noin kolmea grammaa vettä kuivaa ilmakiloa kohden. STM:n suositus on annettu asuinhuoneistolle, joten suositus ei suoraan päde kylmähoitoyksikölle, sillä hoitotilassa ollaan vain muutamia minuutteja kerrallaan. Edellä mainittua kosteuslukemaa tulee kuitenkin tavoitella, jotta varmistetaan hoitoyksikön ilman miellyttävä hengitettävyyys.

5. LASKENTAMENETELMÄT

Luvussa esitellään työn suorituksessa käytetyt menetelmät. Työn suoritus toteutettiin luvuissa 2, 3 ja 4 esitetyn teorian ja laitteiston pohjalta. Laskenta suoritettiin Microsoft Excel- ja EES-ohjelmistoilla [31].

5.1 Stationääri lämpötilajakauma eristerakenteessa

Luku esittää eristerakenteen stationäärin lämpötilajakauman laskennan. Stationäärillä tilanteella tarkoitetaan tässä sitä, että tilan oletetaan olleen jäähdytettynä niin pitkään, että eristerakenne on saavuttanut sille ominaisen tasapainotilan. Lämpötilajakauman laskennassa on tehty seuraavat oletukset: hoitotilan ilman oletetaan olevan tasaisesti -110 °C ja hoitotilan ulkopuolisen lämpötilan tasaisesti 20 °C . Eristerakenteen ominaisuudet oletetaan lämpötilan suhteen vakioiksi. Todellisuudessa esimerkiksi materiaalin lämmönjohtavuus riippuu materiaalin lämpötilasta. Yleisellä tasolla voidaan todeta, että eristemateriaalin lämmönjohtamiskyky heikkenee materiaalin lämpötilan laskiessa. Näin ollen voidaan olettaa, että laskennalla saatu tulos esimerkiksi lämmönjohtumisen osalta on itse asiassa hieman todellista tilannetta suurempi. Tällöin laskentatuloksiin syntyy luonnostaan pieni varmuusvara. Eristemateriaalien lämmönjohtavuuksina on käytetty taulukon 2 arvoja. Ilman ominaisuuksina on käytetty kinemaattisen viskositeetin ja Prandtlin luvun arvoina sisä- ja ulkolämpötiloja vastaavia kirjallisuusarvoja. Ilman ominaisuuksia on esitetty taulukossa 4.

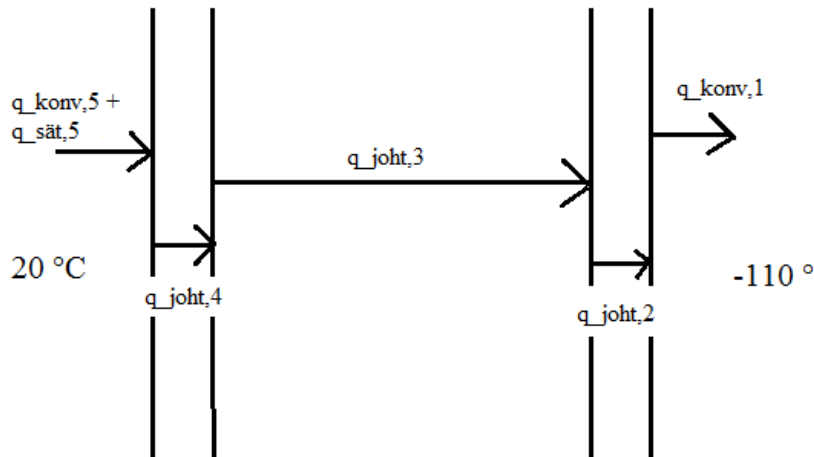
Taulukko 4. Ilman ominaisuuksia [32].

Lämpötila [°C]	Tiheys [kg/m ³]	Ominaislämpö [kJ/kgK]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Kinemaattinen viskositeetti $\times 10^{-6}$ [m ² /s]	Prandtlin luku
-100	1,98	1,01	0,0160	5,95	0,74
-50	1,53	1,01	0,0204	9,55	0,73
0	1,29	1,01	0,0243	13,3	0,72
20	1,20	1,01	0,0257	15,1	0,71

Eristerakenne on kuvan 8 mukainen kolmikerrosrakenne, jossa 150 mm PUR on päällystetty molemmiin puolin 9 mm:n paksuisella filmivanerilla. Eristepintojen kosketusvastukset oletetaan merkityksettömiksi. Laskenta on aloitettu laskemalla eristerakenteen eri kerrosten lämpövastukset yhtälön (10) mukaisesti. Lisäksi lämpövuoto jokaisen eristekerroksen yli ja eristerakenteen ulkopintojen yli oletetaan yhtä suureksi. Tällöin saadaan seuraava yhtälö:

$$q_{konv,1} = q_{joht,2} = q_{joht,3} = q_{joht,4} = q_{konv,5} + q_{sät,5} \quad (35)$$

jossa ensimmäinen termi on konvektiivinen lämmönsiirto eristerakenteen hoitotilan puoleisella pinnalla. Johtumisen lämpövuon termit kuvaavat eri kerrosten yli olevia lämpövoita. Viimeinen termi on yhdistetty konvektion ja säteilyn lämpövuoto eristerakenteen ulkopinnalla. Kuva 16 havainnollistaa yhtälöä (35).



Kuva 16. Lämpövuoto eristerakenteen yli.

Koska lämpövuoto on kaikkialla rakenteessa yhtä suuri, saadaan lähtötietojen perusteella laskettua johtumisen aiheuttamien lämpötilaerojen suhteet yksittäisten eristekerrosten yli yhtälöstä (9). Saadaan, että PUR-kerroksen yli oleva lämpötilan muutos on noin 72-kerertainen filmivanerin yli olevaan lämpötilaeroon verrattuna. Eristekerroksen lämpötilat ratkaistaan EES-ohjelmistolla, joka iteroi lämmönsiirtokerroin eristekerroksen sisä- ja ulkopinnalla. Konvektiivisen lämmönsiirron laskennassa käytetään yhtälöitä (19)...(23) ja (26). Ulkopinnalle lasketaan yhdistetty konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokerroin.

5.2 Epästationääri lämpötilajakauma eristerakenteessa

Epästationääri lämpötilajakauma laskettiin käyttäen yhtälöitä (28)...(32). Ensiksi laskettiin jäähtytysvaiheen ja kylmän ylläpidon aiheuttama lämpötilajakauma eristerakenteessa. Laskenta suoritettiin Microsoft Excel -ohjelmistolla.

Pituusaskeleeksi Δx vanerikerroksessa valittiin kolme millimetriä ja PUR-kerroksessa viisi millimetriä. Aika-askeleeksi Δt valittiin 10 sekuntia. Konvektiiviset lämmönsiirtokerroin laskettiin sisä- ja ulkopinnalla ajan suhteen muuttuvina mahdollisimman tarkan tuloksen saamiseksi. Eristekerroksen ulkopinnalla laskettiin lisäksi säteilyn lämmönsiirtokerroin. Lämmönjohtavuuden ja termisen diffusiviteetin arvot katsottiin taulukosta 2. Ilman aineominaisuudet muuttuvat laskennassa ajan suhteen ilman lämpötilan muuttuessa. Eristerakenteen aineominaisuudet oletetaan ajan ja lämpötilan suhteen vakioarvoiksi.

Yllä mainituilla lähtöoletuksilla Fourier'n luvuksi filmivanerikerroksessa tuli 0,0966 ja PUR-kerroksessa 0,164. Lämmönsiirtokertoimen muuttuessa ajan funktiona myös Biotin luku muuttuu ajan suhteen. Lähtötietojen ja reunaehtojen pohjalta luotiin Microsoft Excel-sovellus, joka laskee lämpötilajakauman jokaiselle aika-askeleelle eksplisiittisellä FDM-menetelmällä. Excel-sovellus laskee myös lämmönsiirtokertoimet sisä- ja ulkopinnalla uudestaan jokaisella aika-askeleella. Samaa sovellusta voidaan käyttää pienin muutoksin kaikkiin hoitoyksikön eristekerrokseen. Esimerkiksi Nusseltin luvun korrelaatio on erilainen yläpohjalle, alapohjalle ja pystyseinälle. Hoituhuoneen ja ulkoilman välisen pystyseinämän laskenta on esitetty alla esimerkkinä.

Pystyseinän laskennassa eristekerroksen sisä- ja ulkopinnalla ($x = 0$ ja $x = 168$ mm) hyödynnettiin yhtälöä (31). Eristekerrosten rajapinnoilla ($x = 9$ mm ja $x = 159$ mm) käytettiin yhtälöä (32). Johtumisen aiheuttama lämpötilan muutos eristekerrosten sisällä ($x = 0 \dots 9$ mm, $x = 9 \dots 159$ mm ja $x = 159 \dots 168$ mm) laskettiin yhtälön (30) avulla. Pistettä $x = 168$ mm ympäröivän ilman lämpötilan T_e oletettiin pysyvän vakiolämpötilassa 20°C ja pistettä $x = 0$ ympäröivän ilman, eli hoituhuoneen sisäpuolisen ilman oletettiin jäähtyvän nopeudella -1 K/min. Kun tavoitelämpötila -110°C saavutettiin, oletettiin lämpötilan pysyvän vakioarvoisena. Laskenta suoritettiin myös niin, että tavoitelämpötilaksi asetettiin -85°C , joka on kaskadikompressorijärjestelmän aikaansaama lämpötila. Tällä tavoin voitiin tutkia eri jäähdytystapojen vaikutusta eristekerroksen lämpötilajakauman muodostumiseen.

Yllä kuvatulla menetelmällä tutkittiin tilannetta, jossa jäähdytyksen alussa eristerakenne on tasaisesti ympäristön lämpötilassa. Viikoittaisen nestetypen kulutuksen kannalta on syytä tarkastella myös tilannetta, jossa kylmähoitoyksikön jäähdytys lopetetaan, ja tilan annetaan lämmitä vapaasti. Edellä mainittu tilanne toistuu useita kertoja viikossa, sillä kylmähoitoyksikön ilmaa ei ole tarkoituksenmukaista ylläpitää kylmänä esimerkiksi yö-aikaan. Kylmähoitoyksikön lämpenemistä simuloidaan työssä niin, että hoituhuone, välihuone ja tuulikaappi oletetaan toisistaan riippumattomiksi suljetuiksi huoneiksi. Simuloidavan huoneen sisältämän ilman lämpenemistä käsitellään olettaen ilma lämpökapasiteettiltaan yhtenäiseksi. Kosteuden vaikutus jätetään huomiotta, sillä kosteuden lämpökuorman kannalta merkittävintä ilmiötä, veden höyrystymistä, ei oleteta tapahtuvan. Lämpenemisvaiheen laskennassa tutkitaan erityisesti pystysuuntaisia ulkoseinämiä, ja ilman lämpenemiseen vaikuttava lämpökuorma lasketaan olettaen koko seinämäpinta-alan käyttäytyvän pystyseinän tavoin. Lämpenemisvaiheen laskenta on aloitettu lämpötilajakaumasta, joka muodostuu, kun tilaa on käytetty kuuden tunnin ajan ilman alkukylmän ylläpitoa kaskadikoneikon avulla. Lämpenemisvaiheen aika-askeleeksi valittiin 30 sekuntia. Tämä muutos muuttaa laskennassa käytettävää Fourier'n lukua hieman suuremmaksi kuin jäähdytysvaiheen laskennassa. Verkon pituusaskeleet ovat samat kuin jäähdytysvaiheen laskennassa.

5.3 Lämpökuormien laskenta

Luku 5.3 esittelee lämpökuormien laskentaan käytetyt menetelmät. Lämpökuormien pohjalta on johdettu nestetyypen kulutus, joka vaaditaan hoitotilan jäähdyttämiseksi.

5.3.1 Seinämien läpi ja eristerakenteesta tuleva lämpökuorma

Lämpökuorma on laskettu ensin stationääritilassa EES-ohjelmistolla luvussa 5.1 esitetyn lämpötilajakauman laskennan pohjalta. Epästationääri lämpökuorma on laskettu Excel-sovelluksella saadun lämpötilajakauman perusteella.

Eristerakenteesta hoitotilaan tuleva lämpökuorma laskettiin jokaiselle aika-askeleelle lämmönsiirtokertoimen ja pinnan yli vallitsevan lämpötilaeron perusteella. Kun lämpövirta tiedettiin ajan funktiona, voitiin laskea lämpövuon keskiarvot muutamilla eripituksilla hoitoyksikön käyttöajoilla. Eristerakenteesta tuleva lämpökuorma on esitetty luvussa 6.2.1 kahden, neljän ja kuuden tunnin käyttöajoilla. Eristerakenteesta tuleva lämpökuorma laskettiin myös niin, että kylmää oli ylläpidetty kaskadikoneikon avulla lämpötilassa -85 °C yhden tai kahden tunnin ajan ennen nestetypin jäähdytyksen aloittamista.

Yllä esitetyn jäähdytysvaiheen laskennan lisäksi työssä tutkittiin myös toistuvien jäähdytys- ja lämpenemisvaiheiden vaikutusta lämpökuormaan ja nestetyypen kulutukseen.

5.3.2 Asiakkaan tuottama lämpökuorma

Asiakkaan aiheuttama lämpökuorma lasketaan aliluvussa 4.1.2 esitetyn teorian pohjalta. Asiakaskuorma lasketaan neljällä eri tavalla. Näin saadaan neljä vertailukelpoista tulosta, joiden pohjalta voidaan arvioida laskennan tarkkuutta.

Asiakaskuorman laskennassa ihmisen pinta-alan oletetaan olevan 2 m^2 ja ihon pintalämpötilan keskimäärin 20 °C , kuten aliluvussa 4.1.2 on esitetty. Säteilylämmönsiirron osuus lasketaan yhtälön (18) avulla käyttäen näkyvyyskertoimina 0,8 ja 0,5. Konvektiivisen lämmönsiirron osuus lasketaan hyödyntäen yhtälöitä (27), (33a) ja (33b). Asiakkaan oletetaan oleskelevan hoitotilassa kolmen minuutin ajan.

Laskettaessa ihmisen konvektiivista lämmönsiirtoa yhtälön (27) avulla ilman aineominaisuudet oletetaan vakioarvoisiksi. Ilman aineominaisuuksien arvioiminen eri tavalla voi aiheuttaa merkittävää virhettä laskentaan, joten yhtälöä (27) hyödyntävä laskenta suoritettiin kahdella tapaa. Ensin laskenta suoritettiin käyttäen ilman aineominaisuuksia lämpötilassa -45 °C , joka on hoitotilan ilman ja ihon pintalämpötilan keskiarvo. Tämän jälkeen laskenta suoritettiin niin, että ilman aineominaisuudet luettiin ihon pintalämpötilan 20 °C mukaan. Edellä mainittujen laskentatapojen lisäksi laskenta suoritettiin vielä yhtälöiden (33a) ja (33b) avulla käyttäen ΔT :lle arvoa 130 °C . Kaikkia laskennalla saatuja konvektiivisia lämpövirtoja korjattiin luvun 4.1.2 mukaisesti kertoimella 0,95.

5.3.3 Lisäilman aiheuttama lämpökuorma

Lisäilman oletettiin tulevan hoitoyksikön tuulikaappiin lämpötilassa 20 °C ja suhteellisen kosteuden ϕ oletettiin olevan noin 50 %. Ilman absoluuttinen kosteus on tällöin noin 7 g/kg . Lisäilman sisältämän vesihöyryn oletettiin härmistyvän kokonaan. Ilman tiheys lämpötilassa 20 °C on noin $1,2\text{ kg/m}^3$ ja kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti c_p on lämpötila-alueella $-110\text{ °C} \dots 20\text{ °C}$ likimain vakio $1,01\text{ kJ/(kgK)}$. Laskentaa yksinkertaistettiin niin, että ilman kosteuden oletettiin tiivistyvän 20-asteiseksi nesteeksi, joka jäähtyy 0-asteiseksi. Tämän jälkeen neste jäätyy ja kiinteä jää jäähtyy -110-asteiseksi. Näiden tietojen ja yhtälön (6) avulla voitiin laskea lisäilman aiheuttama lämpökuorma. Lisäilman määrä saadaan yhtälön (8) avulla, jos lämpötilan muutos tilassa tiedetään. Lisäilman aiheuttama lämpökuorma on laskettu tilavuusyksikköä kohden ja tilanteessa, jossa tila jäähdytetään kaskadikoneikon tuottamasta -85 °C nestetypellä tavoitelämpötilaan -110 °C . Ilma-aukkojen aiheuttama lämpökuorma laskettiin yhtälöllä (34).

5.3.4 Nestetypen kulutus

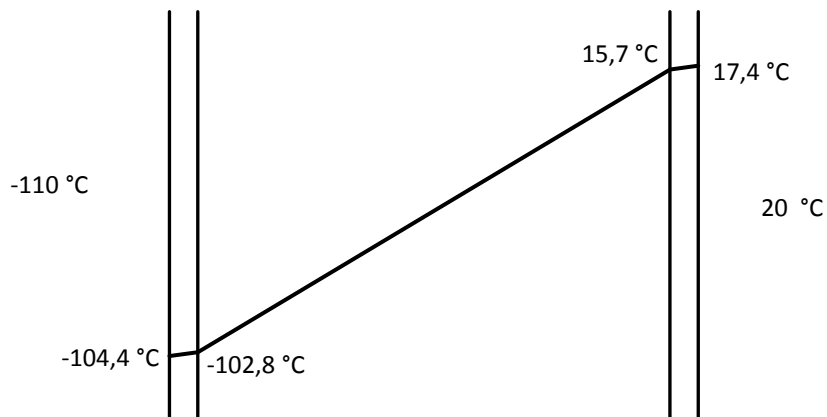
Nestetypen kulutus on laskettu seinämien kautta tulevan lämpökuorman osalta keskimääräisen lämpövuon avulla kahden, neljän ja kuuden tunnin käyttöajoille. Laskennassa on otettu myös huomioon alkukylmän ylläpito kaskadikompressorijärjestelmän avulla yhden tai kahden tunnin ajan. Asiakkaiden lämpökuorman jäähdyttämiseksi vaadittava nestetypin määrä on laskettu yhtä asiakasta kohden, jolloin eri asiakasmäärien aiheuttamia nestetypin kulutusmääriä on helppo vertailla keskenään. Lisäilman lämpökuorman aiheuttama nestetypen kulutus on laskettu kuutiota kohden ja lisäilmamäärälle, joka siirtyy ulkoa hoitotilaan, kun tila jäähdytetään -85 °C :sta -110 °C :seen. Nestetypen entalpian muutokseksi on oletettu 300 kJ/kg .

6. TULOKSET

Luvussa esitellään laskennalla saadut tulokset. Näitä ovat stationäärin ja epästationäärin tilanteen lämpötilajakaumat ja lämpövuot. Edellä mainittujen tekijöiden ja asiakkaiden luovuttaman lämpökuorman pohjalta on laskettu hoitotilan kokonaislämpökuorma. Lämpökuorman pohjalta on johdettu nestetyypen kulutus.

6.1 Lämpötilajakaumat

Tässä aliluvussa esitetään laskennassa saadut lämpötilajakaumat. Stationääri lämpötilajakauma hoitotilan ja ympäröivän tilan välisillä pystyseinillä on esitetty kuvassa 17 ja tärkeimmät stationääritilanteen tulokset koottu taulukkoon 5.

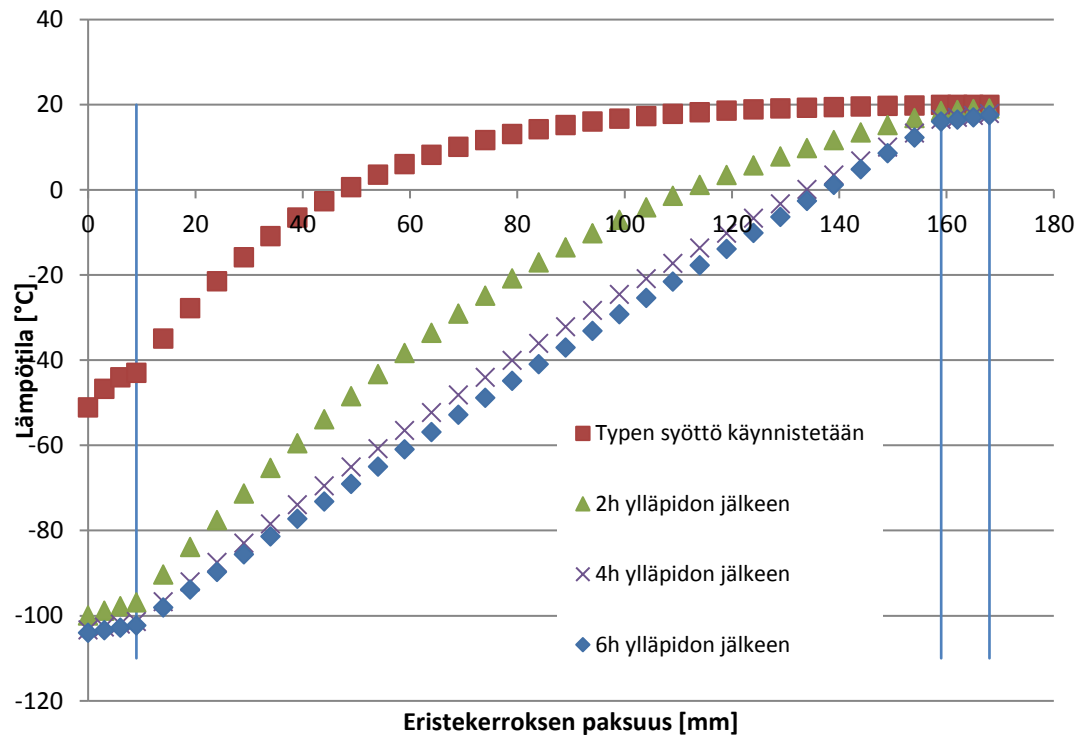


Kuva 17. Stationääri lämpötilajakauma hoituhuoneen pystysuuntaisessa eristerakenteessa.

Taulukko 5. Stationäärin tilanteen laskennassa saadut tärkeimmät tulokset.

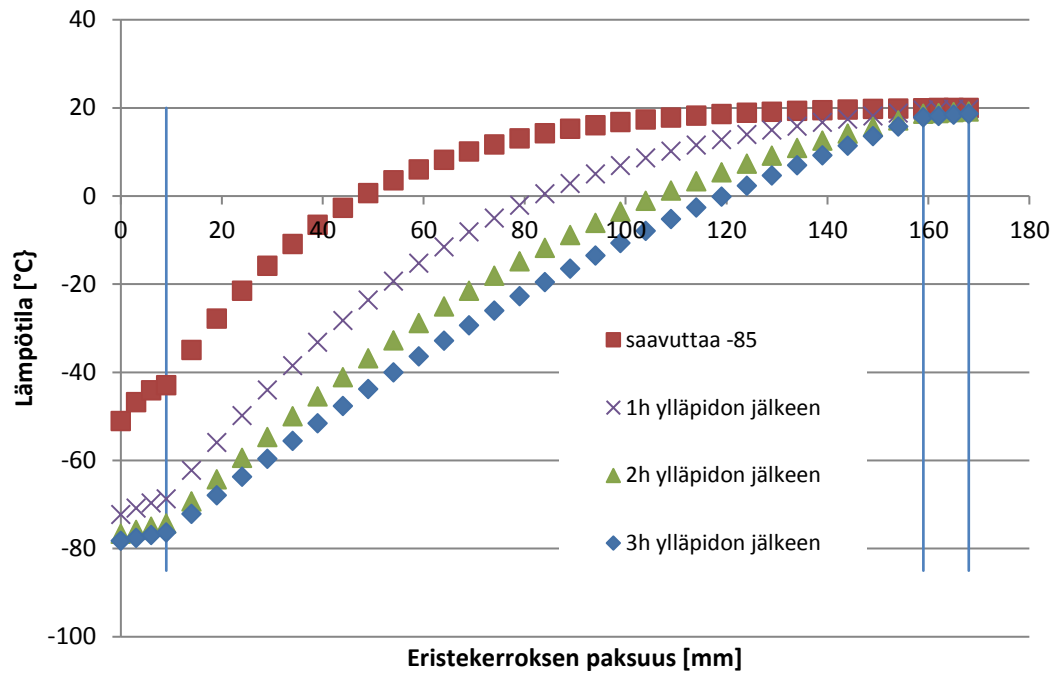
	Sisäpinnalla	Ulkopinnalla
h_c (konv. lämmönsiirtokerroin)	3,23 W/(m ² K)	1,84 W/(m ² K)
h_{rad} (sät. lämmönsiirtokerroin)	-	5,07 W/(m ² K)
q (lämpövuoto)	18,2 W/m ²	18,2 W/m ²
Ra (Rayleigh'n luku)	$1,10 \cdot 10^9$	$4,51 \cdot 10^9$
Nu (Nusseltin luku)	506	177

Jäähdytysvaiheen ja kylmän ylläpitovaiheen lämpötilajakauma hoituhuoneen ulkoseinän eristerakenteessa on esitetty kuvassa 18. Kuvasta 18 huomataan, että neljän tunnin käytön jälkeen kylmähoitoyksikön eristerakenteen lämpötilajakauma muuttuu enää hyvin hietaasti.



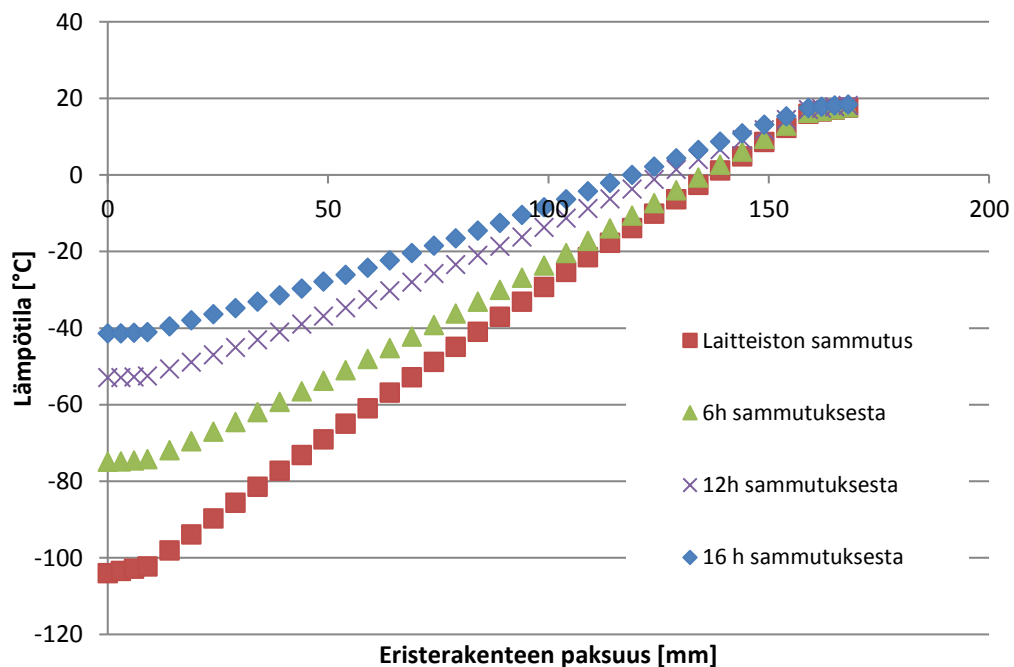
Kuva 18. Jäähdytysvaiheen ja kylmän ylläpidon aikainen hoituhuoneen ulkoseinän lämpötilajakauma.

Jos alkukylmää ylläpidetään kaskadikompressorikoneiston avulla -85 °C :ssa, eristerakenteen lämpötilajakauma muodostuu kuvassa 19 esitetyllä tavalla. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ja lämpövirta eristerakenteen pinnalta hoitotilaan riippuvat voimakkaasti hoitotilan ilman ja eristeen pinnan välillä vallitsevasta lämpötilaerosta. Näin ollen kuvasta 19 nähdään, että lämpökuormaa voidaan vähentää huomattavasti, jos kylmää ylläpidetään -85 °C :ssa jonkin aikaa ennen nestetyypin syötön aloittamista. Lämpökuorman pienenemisestä seuraa suoraan pienentynyt nestetyypin kulutus.



Kuva 19. Jos kylmää ylläpidetään -85 °C:ssa kompressorikoneikon avulla, muodostuu eristekerroksen lämpötilajakauma seuraavasti.

Kun hoitoyksikön jäähdytys lopetetaan, muodostuu hoituhuoneen pystysuuntaisen seinämän lämpötilajakauma kuvan 20 mukaiseksi. Hoitoyksikkö on laskennassa oletettu suljetuksi systeemiksi.



Kuva 20. Hoituhuoneen lämpötilajakauma, kun hoituhuoneen annetaan lämmetä vapaasti käytön loputtua.

Välitilan ja tuulikaapin ulkoseinämien lämpötilajakauma muodostuvat samanmuotoisiksi kuin kuvassa 20, mutta eristerakenteen sisälämpötilat, ja näin ollen likimain myös sisäilman lämpötilat, ovat kuvasta 20 poiketen $-17,5$ ja $-2,8$ °C. Ilman sekoittumisesta johtuen tilan ilma ei ole todennäköisesti jakautunut näin jyrkästi tilojen välillä. Lisäksi lämpöä vuotaa jonkin verran tilan ilmaraoista. Tulokset ovat kuitenkin selkeästi sen suuntaisia, että eristerakenne, ja näin ollen myöskään hoitoyksikön sisäilma, eivät lämpenemisvaiheessa saavuta lähimainkaan ulkoilman lämpötilaa. On oletettavaa, että jaksoittaisella jäähdytyksellä on merkitystä kokonaislämpökuorman ja näin ollen myös nestetypen kulutuksen suuruuteen.

Jos hoitoyksikkö on viikonlopun eli noin 66 tuntia käyttämättä saavuttaa hoituhuoneen sisäilma Excel-laskennan mukaan noin 12 °C lämpötilan. Tämä lämpötilaero on laskennan epävarmuudet huomioon ottaen niin pieni ulkolämpötilaan verrattuna, että näin pitkän lämpenemisvaiheen jälkeen tilan sisäilman ja eristerakenteen voidaan olettaa saavuttaneen ulkolämpötilan arvon.

6.2 Lämpökuormat

Luvussa esitellään tulokset tilaan kohdistuvien lämpökuormien osalta. Tärkeimmät lämpökuormat ovat ulkoa ja eristerakenteesta hoitotilaan siirtyvä lämpö ja tilassa hoidettavien asiakkaiden luovuttama lämpö.

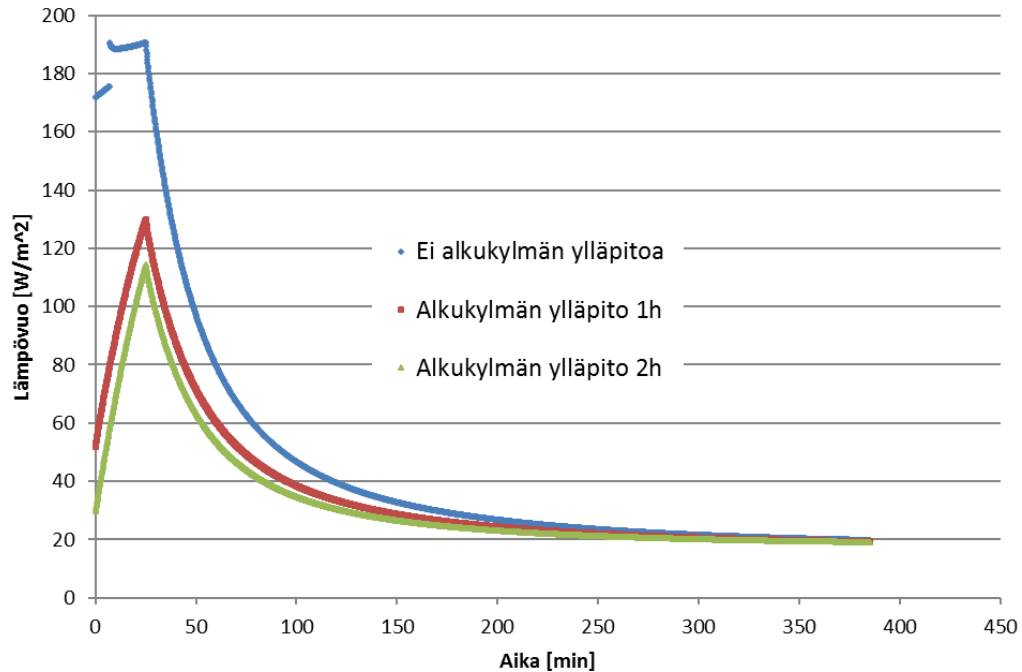
6.2.1 Seinämien kautta tuleva lämpökuorma

Hoituhuoneen pystysuuntaisten ulkoseinämien pinnalta konvektiolla siirtyvät lämpövuot ajan funktiona on koottu kuvaan 21. Keskimääräiset lämpövuot ja näiden vaikutukset nestetypen kulutukseen kahden, neljän ja kuuden tunnin käyttöajoilla on koottu kuviin 22 ja 23. Nämä kuvat on esitetty esimerkinomaisina. Koko kylmähoitoyksikön nestetypen kulutus edellä mainituilla käyttöajoilla on esitetty kuvassa 24 ja taulukossa 6. Aktiivisen käyttöajan välillä tapahtuvan hoitoyksikön lämpenemisen vaikutus lämpökuormaan ja nestetypen kulutukseen on esitetty kuvissa 25 ja 26 ja taulukossa 7.

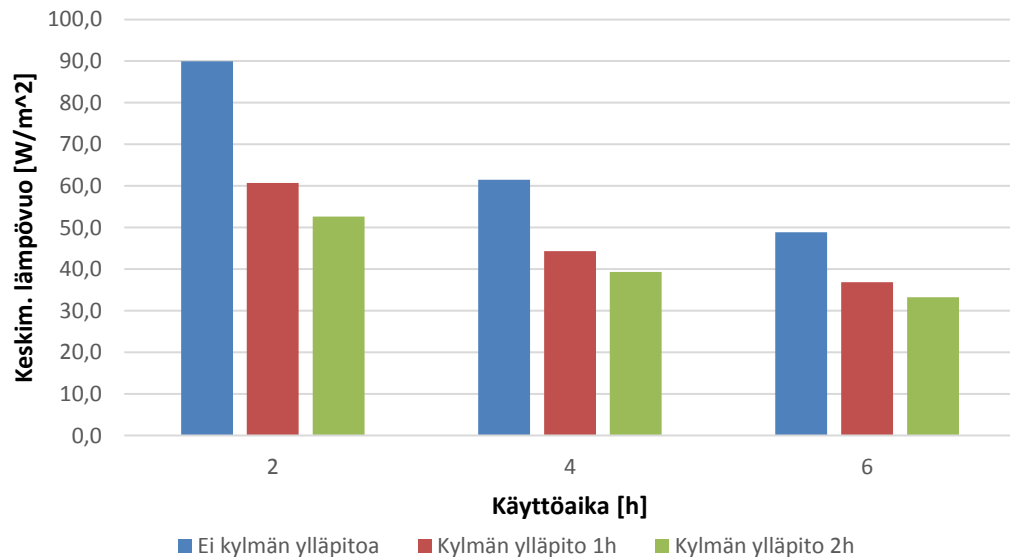
Tärkeimmät huomiot lämpökuorman muodostumisesta liittyvät käyttöajan ja alkukylmän ylläpitoon kaskadikompressorikoneikolla. Huomattavan suuri osa lämpökuormasta muodostuu käyttöajan alkuvaiheessa kuten kuvista 21 ja 25 nähdään. Kun hoituhuoneessa on saavutettu -110 °C:n lämpötila, lämpövirta on suurimmillaan, likimain 10 kW, ja alkaa tämän jälkeen laskea voimakkaasti. Edellä mainitun lämpökuorman jäähdyttämiseen kuluu nestetyppeä noin 0,033 kg/s.

Kuuden tunnin käyttöajalla hoitotilassa ei saavuteta stationääritilaa, mutta jo neljän tunnin käytön jälkeen stationääritilaa ollaan niin lähellä, että eristeen lämpötilan muutoksella ei ole suurta merkitystä lämpökuormaan. Jos tavoitteena on vähentää nestetypen kulu- tusta, voidaan tämä toteuttaa alkukylmän ylläpidolla kaskadikompressorikoneiston

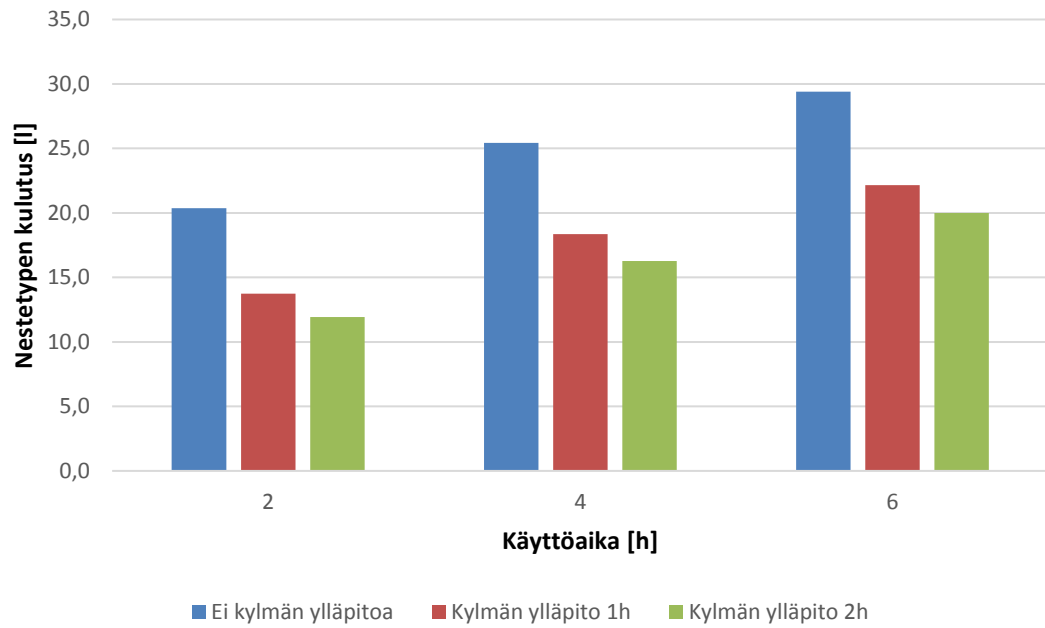
avulla. Kuten taulukossa 6 ja kuvassa 24 on esitetty, voidaan nestetyppeä säästää erityisesti arkiviikon ensimmäisenä päivänä kymmeniä, jopa lähes sata litraa, jos alkukylmää ylläpidetään kahden tunnin ajan. Myös jälkimmäisinä päivinä päästään kymmenien litrojen säästöihin kuten taulukko 7 ja kuva 26 osoittavat.



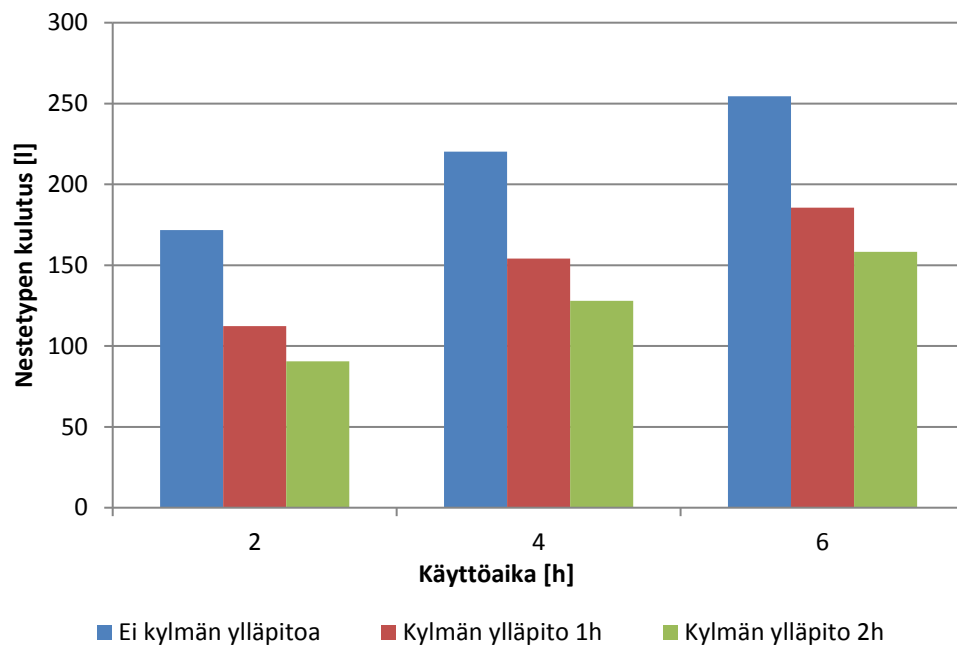
Kuva 21. Pystyseinämästä hoituhuoneeseen siirtyvä lämpövuoto ajan funktiona nestetypen syötön ollessa päällä.



Kuva 22. Keskimääräinen lämpövuoto eristerakenteen sisäpinnalta hoituhuoneeseen nestetypen syötön ollessa päällä.



Kuva 23. Hoituhuoneen yksittäisen pystyseinän kautta tulevan lämpökuorman jäähdyttämiseen tarvittava nestetyppimäärä.

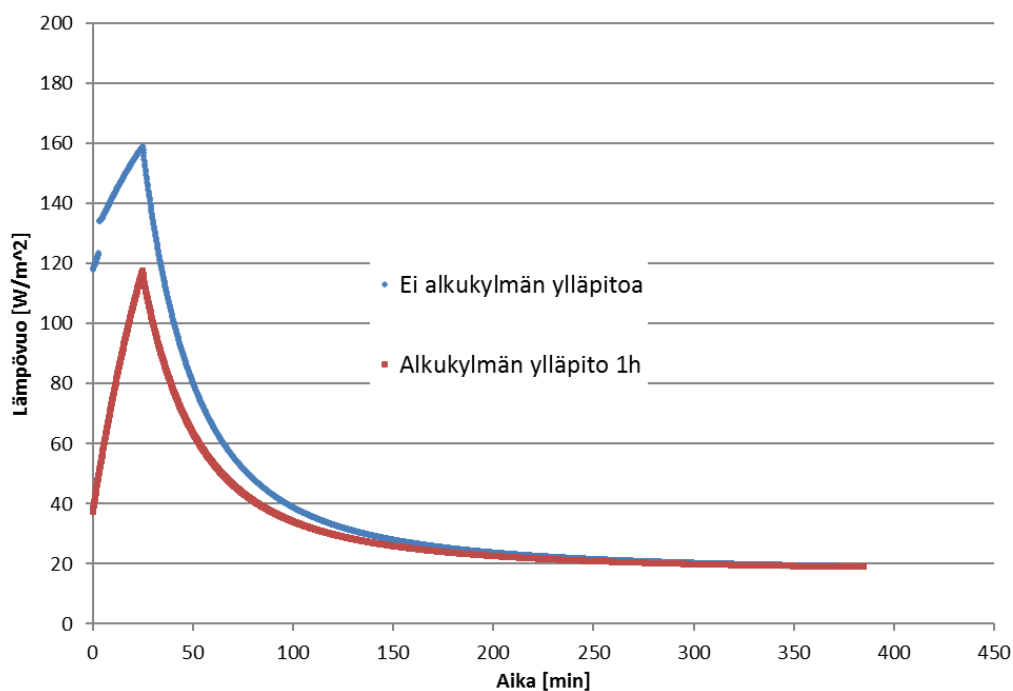


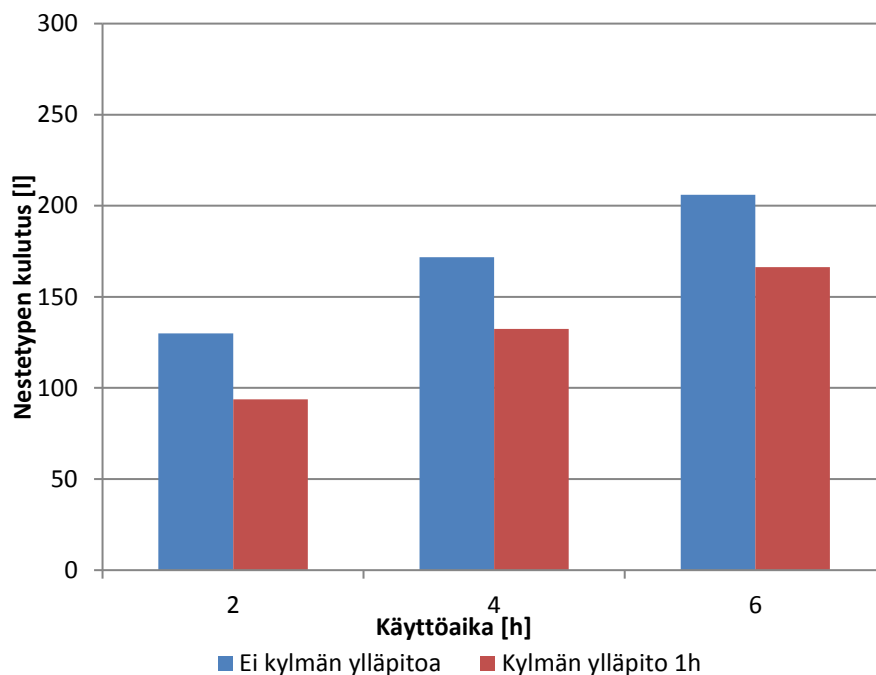
Kuva 24. Kylmähoitoyksikön jäähdytys- ja ylläpitovaiheen nestetyypen kulutus arkiviikon ensimmäisenä päivänä.

Taulukko 6. Kuvan 24 nestetyypen kulutuksen tarkat arvot.

	Ei alkukylmän ylläpitoa	Alkukylmän ylläpito 1h	Alkukylmän ylläpito 2h
Käyttöaika kaksi tuntia	172 litraa	112 litraa	91 litraa
Käyttöaika neljä tuntia	220 litraa	154 litraa	128 litraa
Käyttöaika kuusi tuntia	254 litraa	186 litraa	158 litraa

Edellä on esitetty lämpökuorman ja nestetyypen kulutuksen muodostuminen siinä tapauksessa, että hoitoyksikön jäähdytys aloitetaan tilanteesta, jossa koko hoitoyksikkö eristerakenteineen on ympäröivän ilman lämpötilassa. Seuraavaksi esitetyt tulokset kuvaavat tapausta, jossa hoitoyksikkö on ollut käytössä edellisenä päivänä, ja sen on annettu lämmetä vapaasti käytön loputtua. Tämän jälkeen hoitoyksikön jäähdytys on aloitettu samaan tapaan kuin aiemmassa tapauksessa.

**Kuva 25.** Nestetyypen syötön aikaisen lämpökuorman muodostuminen hoituhuoneen pysyseinällä, kun hoitoyksikkö on ollut ennen jäähdytystä poissa käytöstä 16 tunnin ajan.



Kuva 26. Jäähdytyksen vaatima nestetyypimäärä, kun hoitotila on ollut käytössä edellisenä päivänä.

Taulukko 7. Kylmähoitoyksikön jäähdytykseen tarvittava nestetyypimäärä hoitoyksikön oltua käytössä edellisenä päivänä.

	Ei alkukylmän ylläpitoa	Alkukylmän ylläpito 1h
Käyttöaika kaksi tuntia	130 litraa	94 litraa
Käyttöaika neljä tuntia	172 litraa	132 litraa
Käyttöaika kuusi tuntia	206 litraa	166 litraa

Kuten kuvaa 25 kuvaan 21 vertaamalla huomataan, on hoituhuoneeseen muodostuva lämpökuorma uudessa jäähdytyksessä merkittävästi pienempi kuin viikon ensimmäisellä jäähdytyskerralla. Jos tilaa käytetään viitenä päivänä viikossa normaalin arkiviikon tapaan, on jälkimmäisten jäähdytyskertojen lämpökuormalla suurempi vaikutus nestetyypen kulutukseen kuin viikon ensimmäisellä jäähdytyskerralla. Normaalina arkiviikkona viikoittainen nestetyypen kulutus muodostuu niin, että ensimmäisen jäähdytyksen vaikutus lasketaan kertaalleen ja tätä seuraavien jäähdytysten vaikutus neljästi. Myös peräkkäisten jäähdytysten kyseessä ollessa nestetyypeä voidaan säästää alkukylmän ylläpidolla, mutta ei yhtä merkittäviä määriä kuin viikon ensimmäisen jäähdytyksen kohdalla. Toistuva jäähdytys yhden tunnin alkukylmän ylläpidolla vastaa nestetyypen kulutukseltaan likimain viikon ensimmäistä jäähdytystä kahden tunnin alkukylmän ylläpidolla.

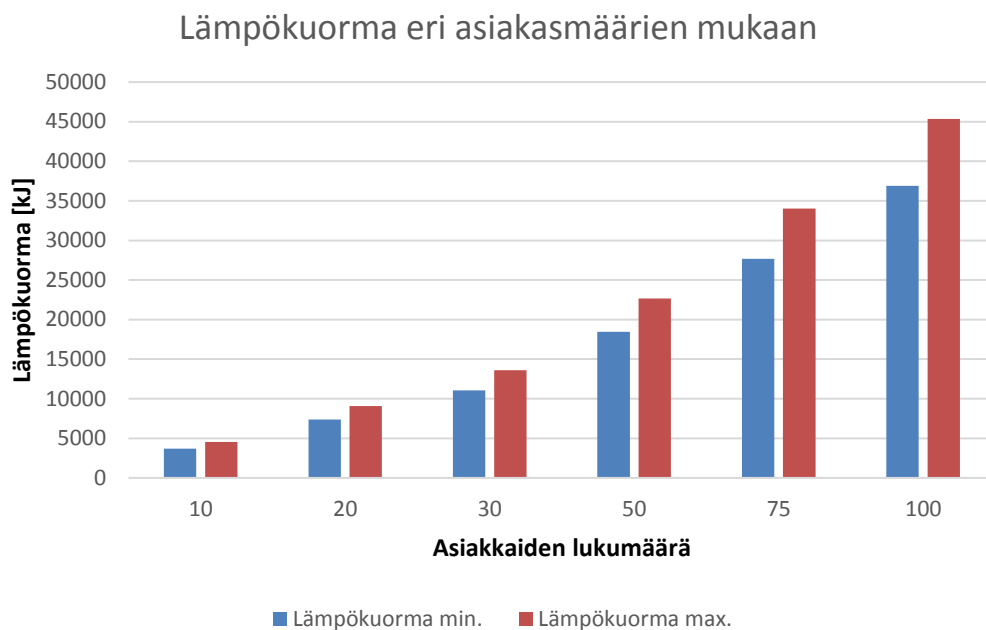
6.2.2 Asiakkaiden muodostama lämpökuorma

Asiakkaan tuottamaksi konvektiiviseksi lämpökuormaksi muodostui neljällä eri laskentatavalla taulukossa 8 esitetyt lämpötehot. Säteilylämmönsiirron ja yhdistetyn lämmönsiirron suuruudet on esitetty samassa taulukossa.

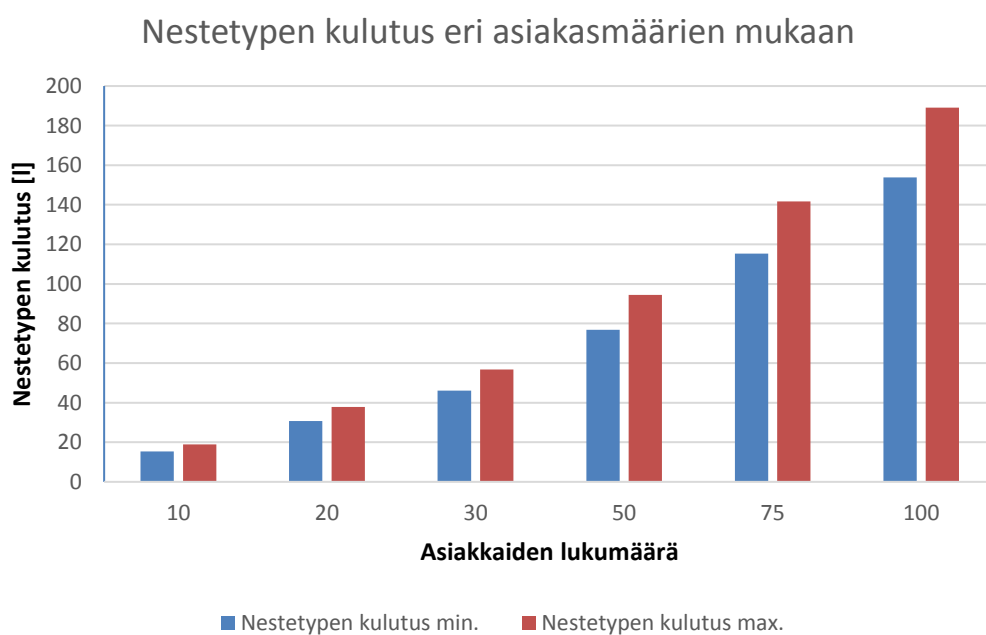
Taulukko 8. Asiakkaiden muodostama lämpökuorma.

Konv. lämpöteho (yhtälö (32a))	1790 W
Konv. lämpöteho (yhtälö (32b))	1580 W
Konv. lämpöteho (yhtälö (27), $T_{\text{ref}} = -110\text{ °C}$)	1620 W
Konv. lämpöteho (yhtälö (27), $T_{\text{ref}} = -45\text{ °C}$)	1850 W
Säteilyn lämpöteho ($F = 0,8$)	544 W
Säteilyn lämpöteho ($F = 0,5$)	340 W
Hengitysilman lämpöteho	126 W
Lämpöteho yhteensä (Min.)	<u>2050 W</u>
Lämpöteho yhteensä (Max.)	<u>2520 W</u>

Yksittäisen asiakkaan muodostamaksi lämpökuormaksi saadaan minimissään 369 kJ ja maksimissaan 454 kJ, kun asiakkaiden oletetaan viipyvän hoitotilassa kolme minuuttia. Eri asiakasmäärille lasketut päivittäiset lämpökuormat on esitetty kuvassa 27 ja asiakkaiden muodostaman lämpökuorman jäähdyttämiseksi tarvittava nestetyypimäärä litroina on esitetty kuvassa 28.



Kuva 27. Asiakkaiden muodostama päivittäinen lämpökuorma muutamilla eri asiakasmäärillä.



Kuva 28. Asiakkaiden muodostaman lämpökuorman jäähdyttämiseen vaadittava nestetyypimäärä.

6.2.3 Lisäilman ja laitteistojen aiheuttama lämpökuorma

Lisäilman aiheuttama lämpökuorma on noin 182 kJ/m^3 . Kun tilaa jäähdytetään lämpötilasta -85°C lämpötilaan -110°C , tulee lisäilmaa noin $2,1 \text{ m}^3$. Tämän ilmamäärän jäähdyttämiseen kuluu nestetyppeä noin 1,5 litraa. $2,1 \text{ m}^3$ lisäilmaa tuo hoitoyksikköön noin 18 grammaa kosteutta. Hoitoyksikön kokonaisilmamäärän ollessa noin 60 kilogrammaa tarkoittaa edellä mainittu kosteuden lisäys noin $0,3 \text{ g/kg}$ (noin $0,5 \text{ g/m}^3$) lisää absoluuttista kosteutta hoitoyksikössä. Tämä on noin kymmenesosa luvussa 4.2.3 esitetystä STM:n suosituksesta asuinhuoneiston ilmalle. Edellä mainittu kosteusmäärä riittää kuitenkin melko voimakkaan sumun tuottamiseen, sillä normaali ulkoilman sumu sisältää vain noin $0,05 \text{ g/m}^3$ absoluuttista kosteutta. Jos laitteiston oletetaan aiheuttavan noin 100 W lämpökuormaa, kuluu tämän lämpökuorman jäähdyttämiseen nestetyppeä noin $1,2 \text{ l/h}$.

Ilma-aukkojen jatkuvaksi lämpökuormaksi saatiin noin $0,8 \text{ kW}$. Tämän lukeman todentamiseksi on kuitenkin erittäin hankala arvioida, sillä hoitotilaan tai hoitotilasta ulos virtaa jatkuvasti ilmaa lämpötilavaihteluista johtuen. Näin ollen ilma-aukon aiheuttamaa lämpökuormaa ei ole otettu mukaan nestetypen kulutuksen laskentaan. $0,8 \text{ kW}$:n lämpökuorman vaikutus nestetypen kulutukseen olisi noin 12 l/h .

6.3 Nestetypen kokonaiskulutus

Taulukossa 6 on kuvattu nestetypen kulutus arkiviikon ensimmäisenä päivänä ja taulukossa 7 seuraavina päivinä. Lisäksi kuvassa 28 on kuvattu asiakkaiden aiheuttaman lämpökuorman jäähdyttämiseen tarvittava nestetyypimäärä. Pääosin edellä mainittujen tulosten ja lisäksi luvun 6.2.3 tulosten perusteella voidaan arvioida viikoittaista nestetypen kulutusta ja erityisesti asiakasmäärän ja eri käyttöaikojen ja -tapojen vaikutusta nestetypen kulutukseen. Tarkastelussa olleiden nestetyypikompressorien päivittäinen nestetypen tuotto on kompressorin mallista riippuen joko 120 litraa tai 240 litraa. Koska kylmähoitoyksikön ei ole tarkoitus olla käytössä viikonloppuisin on todellinen päivittäinen käytössä oleva nestetypen määrä edellä mainittua suurempi. Pienemmällä nestetyypikompressorilla käytössä on noin 180 litraa ja suuremmalla noin 300 litraa päivittäin, jos oletetaan, että nestetyypisäiliön tilavuus on 500 litraa. Näin ollen tarkastellaan käyttötapoja, jotka ovat edellä mainittujen päiväkulutusten koko luokassa. Taulukossa 9 on esitetty pienemmän nestetyypikompressorin nestetypen tuottoon perustuvat rajapisteet, joilla laitteistoa pystytään ajamaan ongelmitta. Taulukossa 10 on esitetty vastaavat pisteet suuremmalle nestetyypilaitteistolle.

Koska työssä on tarkoitus tarkastella myös muita kylmähoitoyksikön toteutustapoja kuin luvussa 3 esitelty standardikokoinen yksikkö, on hyvä tietää hoitoyksikön eri huoneiden vaikutus jäähdytystehontarpeeseen. Jos esimerkiksi tuulikaappi jätetään pois, jäähdytystehontarve luonnollisesti pienenee. Tehontarpeen muutos on likimain tuulikaapin jäähdytystehontarpeen suuruinen, ei kuitenkaan aivan. Tarkasteluun syntyy pientä epätarkkuutta

siitä, että poistuvan väliseinän aiheuttaman lämpökuorman laskenta poikkeaa hieman ulkoseinän laskennasta. Suuruusluokkatarkasteluun tarkkuus on kuitenkin riittävä. Taulukossa 11 on esitetty esimerkkinä nestetyypen kulutuksen jakautuminen huoneittain viikon ensimmäisenä päivänä neljän tunnin käyttöajalla ja yhden tunnin alkukylmän ylläpidolla.

Taulukko 9. Käyttöajan, -tavan ja asiakasmäärän suhteen lasketut rajapisteet, joissa pienemmän nestetyypikompressorin viikkotuotto riittää likimain kattamaan päivittäisen nestetyypen tarpeen.

Alkukylmä 1. pv/2.-5. pv	Päivittäinen käyttöaika	Päivittäinen asiakasmäärä	Nestetyypen ku- lutus/viikko	Nestetyypen ku- lutus/päivä
1 tunti/1 tunti	4 tuntia	20 asiakasta	895 litraa	179 litraa
Ei alkukylmän ylläpitoa	2 tuntia	20 asiakasta	905 litraa	181 litraa
1 tunti/Ei alku- kylmää	2 tuntia	30 asiakasta	931 litraa	186 litraa
2 tuntia/1 tunti	2 tuntia	50 asiakasta	937 litraa	187 litraa

Taulukko 10. Käyttöajan, -tavan ja asiakasmäärän suhteen lasketut rajapisteet, joissa suuremman nestetyypikompressorin viikkotuotto riittää likimain kattamaan päivittäisen nestetyypen tarpeen.

Alkukylmä 1. pv/2.-5. pv	Päivittäinen käyttöaika	Päivittäinen asiakasmäärä	Nestetyypen ku- lutus/viikko	Nestetyypen ku- lutus/päivä
1 tunti/1 tunti	6 tuntia	60 asiakasta	1490 litraa	298 litraa
Ei alkukylmän ylläpitoa	4 tuntia	60 asiakasta	1465 litraa	293 litraa
1 tunti/Ei alku- kylmää	2 tuntia	100 asiakasta	1529 litraa	306 litraa
2 tuntia/1 tunti	4 tuntia	90 asiakasta	1510 litraa	302 litraa

Taulukko 11. Nestetyypin kulutuksen jakautuminen hoitoyksikön huoneiden välillä viikon ensimmäisenä päivänä, yhden tunnin alkukylmän ylläpidolla ja käyttöajan ollessa neljä tuntia. Ei sisällä asiakkaiden aiheuttamaa nestetyypin kulutusta.

Tila	Nestetyypin kulutus
Hoituhuone	111 litraa (72 %)
Välitila	26 litraa (17 %)
Tuulikaappi	17 litraa (11 %)

Taulukon 11 perusteella nähdään, että selvästi suurin osa jäähdytystehontarpeesta tarvitaan hoituhuoneen jäähdyttämiseen. Välihuoneen poisjättämisestä syntyvä 26 litran säästö nestetyypin kulutuksessa vastaa noin 15 asiakkaan aiheuttaman lämpökuorman jäähdyttämiseen tarvittavaa nestetyypimäärää. Lisäksi on syytä huomata, että hoitoyksikön dimensioiden muuttaminen vaikuttaa jäähdytystehontarpeen muodostumiseen. Jäähdytystehontarve on lähes suoraan verrannollinen seinämäpinta-alaan. Jos esimerkiksi hoituhuonetta kavennetaan metrillä, pienenevät sekä ylä- ja alapohjan että kahden ulkoseinän pinta-alat noin 6,3 neliömetristä 3,8 neliömetriin. Tämä tilan pienennys vähentää taulukon 11 mukaisella tilanteella nestetyypin kulutusta noin 31 litraa. Huonekonfiguraation muutokset mahdollistavat erittäin merkittäviä säästöjä nestetyypimäärissä, jos päivittäiset asiakas- tai käyttöaikatavoitteet niin vaativat.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Luvussa käsitellään työssä saatuja tuloksia. Lisäksi pohditaan luvussa 1.3 esitettyjä standardimallisesta kylmähoitoyksiköstä (kuva 6) poikkeavia toteutustapoja ja näiden vaikutuksia kylmähoitoyksikön toimintaan. Edellä mainittuja toteutustapoja ovat hoitoyksikön mittojen muuttaminen, välihuoneen tai tuulikaapin poisjättäminen ja kaskadikompressorikoneikon poisjättäminen. Lisäksi tehdään lyhyt katsaus hoitoyksikön tulevaisuuden kehityskohteisiin.

7.1 Nestetyypen kulutus ja toteutustapamuutokset

Työn tärkeimmät tulokset liittyvät jäähdytystehontarpeen ja tästä johtuvan nestetyypen kulutuksen muodostumiseen. Selvästi merkittävin osa lämpökuormasta syntyy jokaisen jäähdytyskerran alkuvaiheessa. Tästä johtuen kylmän ylläpito -85 °C :ssa kaskadikompressorikoneikon avulla ennen nestetyypijäähdytyksen aloittamista pienentää nestetyypijäähdytyksen aikaista seinämien kautta tulevaa lämpökuormaa merkittävästi. Tällä on hyvin huomattava vähentävä vaikutus nestetyypen kulutukseen. Taulukoiden 6 ja 7 perusteella nestetyypisäästö voi alkukylmän ylläpidolla olla viikkotasolla jopa noin 240 litraa, jos hoitoyksikköä käytetään kuusi tuntia päivittäin. Edellä mainitut tulokset on laskettu kuvan 6 mukaisilla mitoilla toteutetulle kylmähoitoyksikölle.

Taulukossa 11 on esitetty kylmähoitoyksikön jäähdyttämiseen tarvittavan nestetyypimäärän likimääräinen jakautuminen huoneittain. Kylmähoitoyksikön dimensioiden muuttaminen tai huoneiden poisjättäminen vaikuttaa muodostuvaan lämpökuormaan ja näin ollen myös nestetyypen kulutukseen likimain samassa suhteessa. Välihuoneen poisjättäminen vähentää nestetyypen kulutusta noin 17 % ja tuulikaapin poisjättäminen noin 11 %. Toisen huoneen poisjättäminen on perusteltua, jos nestetyypen kulutusta halutaan pienentää. Nestetyypen kulutusta voidaan pienentää myös pienentämällä hoitohuoneen seinäpinta-alaa. Seinäpinta-alan pienentäminen esimerkiksi 20 % vähentää myös hoitohuoneeseen kohdistuvaa jäähdytystehontarvetta noin 20 %. Edellä mainitut muutokset säästävät nestetyypen lisäksi tilaa, jos tilaoptimoinnille on tarvetta. Seinäpinta-alan pienentämisestä seuraa lisähyötynä myös materiaalikustannusten pieneneminen.

Luvussa 1.3 oli esitetty mahdollisena järjestelmämuutoksena kaskadikompressorikoneiston poisjättäminen. Pelkällä nestetyypellä toteutettuna jo kahden tunnin käyttöajalla kylmähoitoyksikkö kuluttaa noin 400 litraa nestetyyppeä. Näin ollen kaskadikompressorijärjestelmää ei voida jättää pois, jos standardimallisen kylmähoitoyksikön on tarkoitus toimia jommallakummalla harkinnassa olleista nestetyypikompressoreista. Kaskadikompressorikoneikon ensisijainen tarkoitus kylmähoitoyksikössä onkin juuri nestetyypen kulutuksen vähentäminen. Jos kylmähoitoyksikön dimensioita pienennetään merkittävästi,

nestetyypin kulutus pienenee. Tuulikaapin poisjättämisellä ja varsinaisen hoituhuoneen pienentämisellä voidaan päästä nestetyypin kulutuksen kannalta huomattavasti pienempiin arvoihin. Tällöin työssä tarkasteltujen nestetyyppikompressorien päivätuotot saattavat mahdollistaa kaskadikompressorijäähdytyksen poisjättämisen.

7.2 Tulevaisuuden kehityskohteet

Työn laskennassa typen on oletettu lämpenevän lämpötilaan $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tämän jälkeen höyrystynyt -100 -asteinen typpi poistetaan ulkoilmaan. Typellä on tällöin jäljellä vielä merkittävää jäähdytyspotentiaalia esimerkiksi teknisen tilan maksimilämpötilaan $45\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen verrattuna. Näin ollen höyrystynyttä typpeä voitaisiin käyttää edelleen teknisen tilan jäähdytykseen tai kesällä lähiympäristössä sijaitsevan kiinteistön jäähdytykseen. Toinen mahdollinen tulevaisuuden kehityskohde on päinvastainen. Lämmityskauden aikana tekniseen tilaan sijoitetun laitteiston aiheuttamaa lämpökuormaa voitaisiin hyödyntää jonkin lähikiinteistön lämmityksessä. Esimerkiksi pienemmän harkinnassa olleen nestetyyppikompressorin, StirLIN-1 Economyn, tehonkulutus on noin 17 kW . Jos nestetyyppikompressorin oletetaan olevan päällä 24 tuntia vuorokaudessa, ja kaiken tehonkulutuksen oletetaan muuttuvan lämmöksi, on päivittäinen lämmöntuotanto laitteistolla noin 400 kWh . Vuositasolla lämmöntuotto olisi noin $14,6\text{ MWh}$. Tämän lämpömäärän hyödyntäminen merkitsisi mittavia säästöjä lähikiinteistön lämmityskustannuksissa.

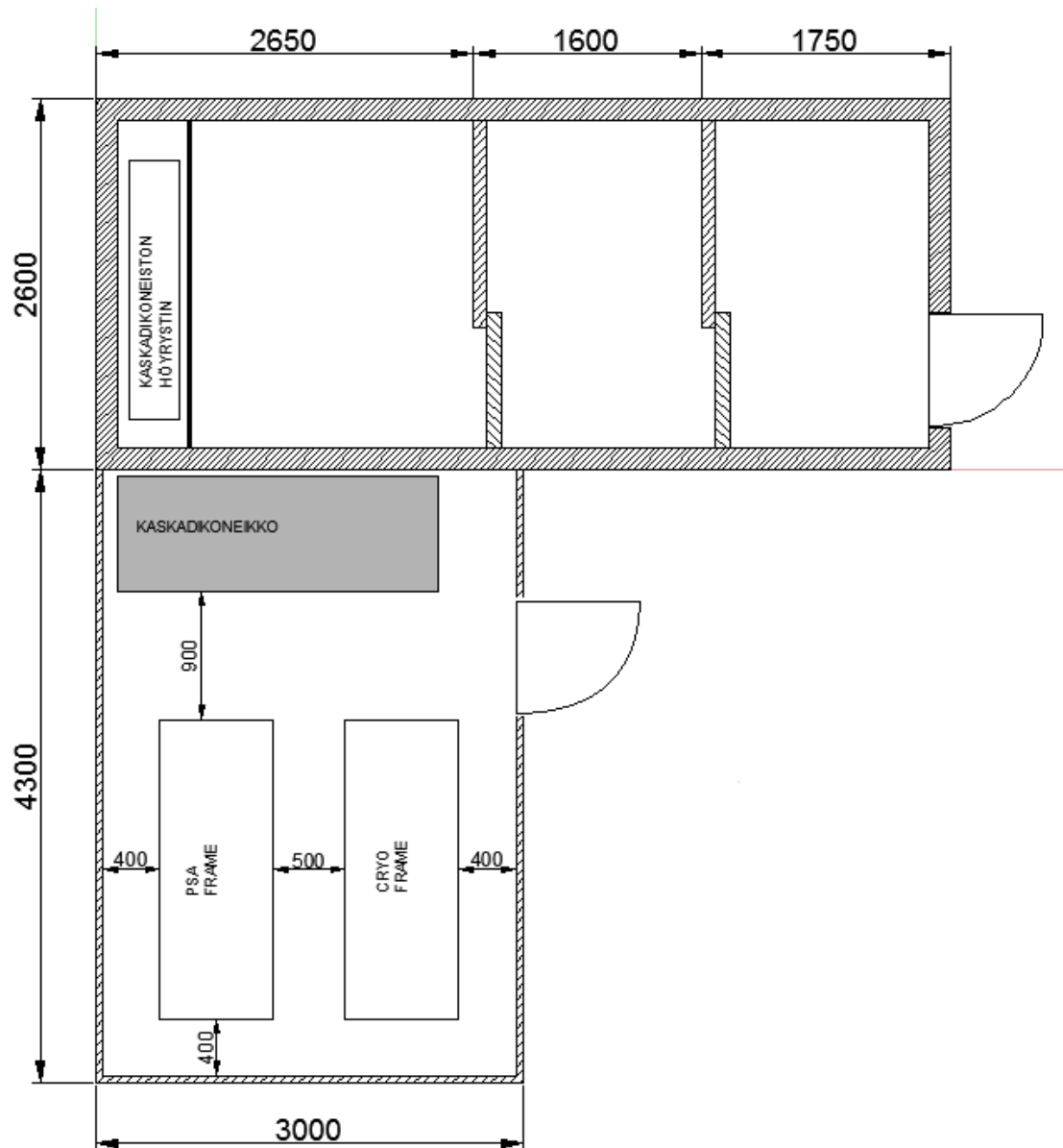
Liikuteltavan yksikön toteuttaminen ei vaadi laitteistoon merkittäviä muutoksia. Kylmähoitoyksikön standardimalli on mitoitettu pienemmäksi kuin ELY-keskuksen ohjeistamat kuorma-autokuljetuksen maksimirajat [33].

LÄHTEET

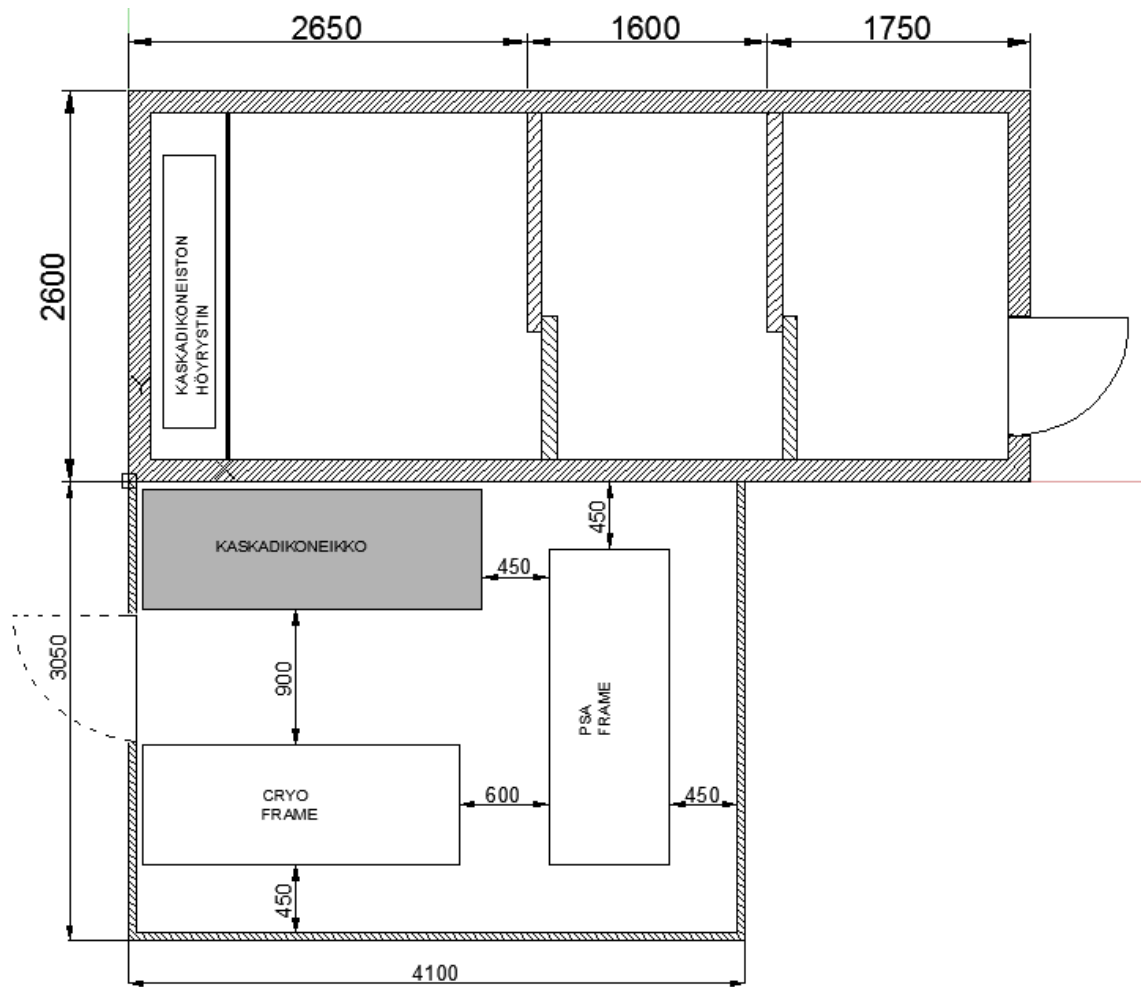
- [1] Lubkowska, A., Banfi, G., Dołęgowska, B., d'Eril, G.V.M., Łuczak, J. & Barassi, A. Changes in lipid profile in response to three different protocols of whole-body cryostimulation treatments. *Cryobiology* 61(2010)1, pp. 22-26.
- [2] Smolander, J., Leppäluoto, J., Westerlund, T., Oksa, J., Dugue, B., Mikkelsen, M. & Ruokonen, A. Effects of repeated whole-body cold exposures on serum concentrations of growth hormone, thyrotropin, prolactin and thyroid hormones in healthy women. *Cryobiology* 58(2009)3, pp. 275-278.
- [3] Dulian, K., Laskowski, R., Grzywacz, T., Kujach, S., Flis, D.J., Smaruj, M. & Ziemann, E. The whole body cryostimulation modifies irisin concentration and reduces inflammation in middle aged, obese men. *Cryobiology* 71(2015)3, pp. 398-404.
- [4] Kröger, M., De Mareés, M., Dittmar, K., Sperlich, B. & Mester, J. Whole-body Cryotherapy's enhancement of acute recovery of running performance in well-trained athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 10(2015)5, pp. 605-612.
- [5] Banfi, G., Melegati, G., Barassi, A., Dogliotti, G., Melzi d'Eril, G., Dugué, B. & Corsi, M.M. Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. *Journal of thermal biology* 34(2009)2, pp. 55-59.
- [6] Rymaszewska, J., Tulczynski, A., Zagrobelny, Z., Kiejna, A. & Hadrys, T. Influence of whole body cryotherapy on depressive symptoms - Preliminary report. *Acta Neuropsychiatrica* 15(2003)3, pp. 122-128.
- [7] Szczepanska-Gieracha, J., Borsuk, P., Pawik, M. & Rymaszewska, J. Mental state and quality of life after 10 session whole-body cryotherapy. *Psychology, Health and Medicine* 19(2014)1, pp. 40-46.
- [8] Rymaszewska, J. & Ramsey, D. Whole body cryotherapy as a novel adjuvant therapy for depression and anxiety. *Archives of Psychiatry and Psychotherapy* 10(2008)2, pp. 49-57.
- [9] Virtanen, K.A., Lidell, M.E., Orava, J., Heglind, M., Westergren, R., Niemi, T., Taittonen, M., Laine, J., Savisto, N., Enerbäck, S. & Nuutila, P. Functional Brown Adipose Tissue in Healthy Adults. *N Engl J Med* 360(2009)15, pp. 1518-1525.
- [10] Gröhn, M. *Univers Cryo LIN2*. MJG Univers. Helsinki, 2007, [viitattu 13.4.2016]. Saatavissa: <http://www.mjgunivers.fi/linfin.htm>.

- [11] Aittomäki, A. Kylmäteknikka. 3. painos. Jyväskylä 2008, Suomen kylmäyhdistys r.y. 406 s.
- [12] Mills, A.F. Basic Heat and Mass Transfer. Second ed. Upper Saddle River 1999, Prentice Hall, Inc. 1000 p.
- [13] Churchill, S.W. & Chu, H.H.S. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. International Journal of Heat and Mass Transfer 18(1975)11, pp. 1323-1329.
- [14] Kadambi, V. & Drake, R.M. Free convection heat transfer from horizontal surfaces for prescribed variations in surface temperature and mass flow through the surface. 1960, Princeton University.
- [15] Corcione, M. Heat transfer correlations for free convection from upward-facing horizontal rectangular surfaces. WSEAS TRANSACTIONS on HEAT and MASS TRANSFER 2(2007)3, pp. 48-60.
- [16] Lamio, P. & Gröhn, M. Erittely CryoFog -110 °C-kylmähoitomenetelmässä käytettävistä komponenteista. Laitteistosuunnitelma.
- [17] Stan, L. & Mitu, D. Cryogenics applications in the maritime field. Proceedings of the 6th International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems, Brasov, Romania, June 1-3, 2013. pp. 42-46.
- [18] Stirling Cryogenics Projects. Stirling Cryogenics. [viitattu 18.8.2016]. Saatavissa: <http://www.stirlingcryogenics.com/en/projects/maritime/rv-maria-merian>.
- [19] Polyuretaanista (PUR/PIR) valmistetut lämmöneristeet. PU Nordic.
- [20] Westerlund, T., Oksa, J., Smolander, J. & Mikkelsson, M. Thermal responses during and after whole-body cryotherapy (-110 °C). Journal of thermal biology 28(2003)8, pp. 601-608.
- [21] Savolainen, J., Laukka, A., Jaurto, A. & Palos, A. Aikuisten ihon pinta-ala nomogrammi [WWW]. Hämeen ammattikorkeakoulu. 2007, [viitattu 23.02.2016]. Saatavissa: <http://laakelaskenta.hamk.fi/laakelaskenta/annosiho.php>.
- [22] Kurazumi, Y., Tsuchikawa, T., Ishii, J., Fukagawa, K., Yamato, Y. & Matsubara, N. Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection. Building and Environment 43(2008)12, pp. 2142-2153.
- [23] Manabe, M., Yamazaki, H. & Sakai, K. Shape factor simulation for the thermal radiation environment of the human body and the VRML visualization. Building and Environment 39(2004)8, pp. 927-937.

- [24] Adams, W.C. Measurement of Breathing Rate and Volume in Routinely Performed Activities. Sacramento, CA 1994, University of California, Davis.
- [25] Popov, T.A., Dunev, S., Kralimarkova, T.Z., Kraeva, S. & DuBuske, L.M. Evaluation of a simple, potentially individual device for exhaled breath temperature measurement. *Respiratory medicine* 101(2007)10, pp. 2044-2050.
- [26] Mollier Diagram | Diagram site. [diagrama.xyz](http://www.diagrama.xyz). [viitattu 29.8.2016]. Saatavissa: <http://www.diagrama.xyz/mollier-diagram/>.
- [27] Young, J. Low-Temperature Applications. In: Owen, M.S. (ed.). *ASHRAE Handbook - Refrigeration*. Atlanta, GA 2014, ASHRAE. pp. 47.1.
- [28] CoolPack Tutorial - Version 1.46. Copenhagen 2001, Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark.
- [29] Keistoer Interactieve Media Liquid Nitrogen Systems. Stirling Cryogenics. [viitattu 05/12]. Saatavissa: <http://www.stirlingcryogenics.com/products/Liquid-Nitrogen-Systems/Up-to-300-l/day/StirLIN1-Economy/specifications/>.
- [30] Sosiaali- ja terveysministeriö Asumisterveysohje. Helsinki 2003, Sosiaali- ja terveysministeriö.
- [31] Energy Equation Solver for Microsoft Windows Operating Systems. Madison, WI 1992, F-Chart Software.
- [32] The Engineering Toolbox. [viitattu 8.8.2016]. Saatavissa: http://www.engineering-toolbox.com/air-properties-d_156.html.
- [33] Milloin erikoiskuljetuslupaa ei tarvita EU- tai ETA-valtiossa rekisteröydelle ajoneu-
ovolle. 2013, Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus.

LIITE A: TEKNISEN TILAN ASEMOINTIVAIHTOEHTOJA

Kuva A.1. Vaihtoehtoinen asemointi 1.



Kuva A.2. *Vaihtoehtoinen asemointi 2.*